



TUGAS AKHIR - TE 141599

**IMPLEMENTASI *ANALOG FRONT END* PADA SENSOR
KAPASITIF UNTUK PENGATURAN KELEMBABAN
MENGUNAKAN MIKROKONTROLLER STM32**

Rendy Setiawan
NRP 2212100108

Dosen Pembimbing
Dr. Muhammad Rivai, S.T., M.T.
Suwito, S.T., M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

**IMPLEMENTATION OF ANALOG FRONT END ON
CAPACITIVE SENSOR FOR HUMIDITY CONTROL USING
STM32 MICROCONTROLLER**

Rendy Setiawan
NRP 2212100108

Advisor
Dr. Muhammad Rivai, S.T., M.T.
Suwito, S.T., M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

**IMPLEMENTASI ANALOG FRONT END PADA SENSOR
KAPASITIF UNTUK PENGATURAN KELEMBABAN
MENGUNAKAN MIKROKONTROLLER STM32**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Elektronika
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

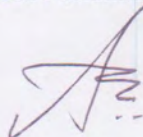
Dosen Pembimbing I,



Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.

NIP.196904261994031003

Dosen Pembimbing II,



Suwito, ST., MT.

NIP.198101052005011004



IMPLEMENTASI *ANALOG FRONT END* PADA SENSOR KAPASITIF UNTUK PENGATURAN KELEMBABAN MENGGUNAKAN MIKROKONTROLLER STM32

Nama : Rendy Setiawan
Pembimbing I : Dr. Muhammad Rivai, S.T., M.T.
Pembimbing II : Suwito, S.T., M.T.

ABSTRAK

Sensor kapasitif merupakan jenis sensor yang mengubah stimulus fisik menjadi perubahan kapasitansi. Pada sensor kapasitif, adanya *stray capacitance* atau kapasitansi parasitik pada sensor dapat menyebabkan kesalahan dalam pengukuran. Dalam aplikasi pengaturan kelembaban, dibutuhkan sistem pengukuran kelembaban dengan kesalahan minimum untuk mendapatkan nilai *setting point* dengan galat minimum. Maka diperlukan implementasi *analog front end* yang dapat meminimalisir kesalahan akibat *stray capacitance* pada sensor kapasitif untuk pengukuran kelembaban relatif. Penelitian pada tugas akhir ini adalah menentukan pengaruh dari implementasi *analog front end* pada pengukuran kelembaban relatif dengan sensor kapasitif untuk aplikasi pengaturan kelembaban menggunakan mikrokontroler STM32. *Analog front end* merupakan rangkaian elektronika yang berfungsi untuk mengondisikan sinyal dari sensor sebelum menuju akuisisi data. Pada tugas akhir ini digunakan sensor kelembaban berbasis kapasitif HS1101. Keluaran dari *analog front end* dikonversi menjadi sinyal DC dengan demodulator sinkron dan filter *low pass* kemudian didigitalkan menggunakan ADC mikrokontroler STM32. Pengukuran kelembaban relatif dengan implementasi *analog front end* kemudian digunakan untuk pengaturan kelembaban yang menggunakan aktuator berupa *humidifier* ultrasonik dan kipas ventilasi. Berdasarkan hasil dari pengujian, rangkaian *analog front end* dapat mengompensasi *stray capacitance* dengan kesalahan pembacaan nilai kapasitansi maksimal sebesar 4.2% pada kondisi *stray capacitance* sebesar 236,6pF, 174,3pF dan 115,7pF. Implementasi *analog front end* pada pengaturan kelembaban menghasilkan galat pada *setting point* maksimal sebesar 8.8% untuk nilai RH 75% dan 33%.

Kata kunci : *analog front end*, sensor kapasitif, *stray capacitance*

IMPLEMENTATION OF ANALOG FRONT END ON CAPACITIVE SENSOR FOR HUMIDITY CONTROL USING STM32 MICROCONTROLLER

Name : Rendy Setiawan
1st Advisor : Dr. Muhammad Rivai, S.T., M.T.
2nd Advisor : Suwito, S.T., M.T.

ABSTRACT

Capacitive sensor is a type of sensor that changes physical stimulus into changes in electrical units, which is capacitance. In capacitive sensor, the existence of stray capacitance in sensor might cause error in measurement. In application such as humidity control, it is necessary to have a humidity measurement system with minimum error to achieve a setting point with minimum error. In that case, it is necessary to implement an analog front end that capable of minimizing error due to stray capacitance in capacitive sensor for relative humidity measurement. Research on this final project is to determine the effect of implementing an analog front end in relative humidity measurement with capacitive sensor for humidity control application using STM32 microcontroller. Analog front end is an electronic circuit which serve as signal conditioning for sensor's signal, before its headed to data accusation. In this final project, HS1101 capacitive humidity sensor was used. The output of analog front end then converted to DC signal with a synchronous demodulator and a low pass filter, then digitized with ADC in STM32 microcontroller. Relative humidity measurement with the implementation of analog front end then utilized for humidty control, with ultrasonic humidifier and exhaust fan as actuators. From test result, analog front end circuit is capable of compensating for stray capacitance with maximum error in capacitance reading of 4.2% for stray capacitance in values of 236,6pF, 174,3pF and 115,7pF. Implementation of analog front end in humidity control resulted in maximum setting point error of 8.8% for 75% and 33% RH.

Key words: analog front end, capacitive sensor, stray capacitance

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	5
1.7 Relevansi dan Manfaat	5
BAB II TEORI PENUNJANG	7
2.1 Dasar Teori	7
2.1.1 Sensor Kapasitif	7
2.1.1.1 <i>Stray Capacitance</i>	9
2.1.2 Analog Front End	11
2.1.2.1 <i>Penguat Pembalik</i>	11
2.1.2.2 <i>Pengali Kapasitansi</i>	15
2.1.2.3 <i>Penguat Instrumentasi</i>	21
2.1.3 Sistem Akuisisi Data	26
2.1.3.1 <i>Generator Sinyal</i>	27
2.1.3.2 <i>Filter Low Pass</i>	28
2.1.3.3 <i>Mikrokontroler STM32</i>	32
2.1.3.4 <i>Demodulator sinkron</i>	33
2.1.4 Komunikasi Serial	36
2.1.4.1 <i>Konverter Serial TTL ke Serial RS232</i>	36
2.1.4.2 <i>Konverter Serial RS232 to USB</i>	38
2.1.5 Kelembaban	38

2.1.5.1	<i>Larutan Garam Tersaturasi</i>	40
2.1.6	Plant Growth Chamber	41
2.1.7	Kontroller	42
2.1.8	Aktuator	42
2.1.8.1	<i>Humidifier Ultrasonik</i>	42
2.1.8.2	<i>Kipas Ventilasi</i>	43
2.1.8.3	<i>Solid State Relay</i>	44
BAB III	PERANCANGAN SISTEM	45
3.1	Diagram Blok Sistem	45
3.2	Sistem Akuisisi Data	46
3.2.1	Rangkaian Generator Sinyal	46
3.2.2	Rangkaian Filter Low Pass	49
3.2.3	Sensor Kapasitif HS1101	50
3.2.4	Rangkaian Demodulator Sinkron	52
3.2.5	Program Pembacaan ADC STM32	53
3.2.6	Rangkaian Konverter Serial ke RS232	54
3.2.7	Konverter RS232 ke USB	54
3.2.8	Komputer	55
3.2.9	Program Komunikasi Serial STM32	55
3.2.10	Program Akuisisi Data	56
3.3	Analog Front End	58
3.3.1	Rangkaian Penguat Pembalik	58
3.3.2	Rangkaian Pengali Kapasitansi	60
3.3.3	Rangkaian Penguat Instrumentasi	61
3.4	Kontroller	62
3.5	Aktuator dan Driver	64
3.5.1	Humidifier Ultrasonik	64
3.5.2	Kipas Ventilasi	65
3.5.3	Rangkaian Solid State Relay	66
3.6	Plant Growth Chamber	67
BAB IV	PENGUJIAN DAN ANALISIS	69
4.1	Pengujian Rangkaian Generator Sinyal	69
4.2	Pengujian Rangkaian LPF -40dB/dec	70
4.3	Pengujian Pembacaan ADC STM32	72
4.4	Pengujian Analog Front End	73
4.4.1	Pengujian Kompensasi <i>Stray Capacitance</i>	74

4.4.2	Pengujian Pengukuran Sensor Kapasitif Tanpa Analog Front End	78
4.5	Kalibrasi Pengukuran Kelembaban Relatif dengan Implementasi Analog Front End.....	83
4.6	Realisasi Desain Plant Growth Chamber	85
4.7	Pengujian Sistem Pengaturan Kelembaban Relatif.....	88
BAB V PENUTUP.....		89
5.1	Kesimpulan.....	89
5.2	Saran	89
DAFTAR PUSTAKA		91
LAMPIRAN.....		93
BIODATA PENULIS		97

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai kelembaban mutlak pada suhu udara tertentu	39
Tabel 2.2	Kelembaban relatif beberapa larutan garam tersaturasi	40
Tabel 3.1	Karakteristik sensor kapasitif HS1100	51
Tabel 4.1	Pengujian rangkaian rangkaian LPF -40dB/dec 2.5Hz	71
Tabel 4.2	Tabel Perbandingan Pembacaan Tegangan ADC dengan Pembacaan Tegangan Aktual	72
Tabel 4.3	Hasil pengujian Analog Front End pada kondisi <i>stray</i> <i>capacitance</i> = 236,6pF	74
Tabel 4.4	Hasil pengujian Analog Front End pada kondisi <i>stray</i> <i>capacitance</i> = 174,3pF	74
Tabel 4.5	Hasil pengujian Analog Front End pada kondisi <i>stray</i> <i>capacitance</i> = 115,7 pF	75
Tabel 4.6	Hasil pengujian dengan konversi pembacaan dalam kapasitansi untuk <i>stray capacitance</i> 236,6pF	77
Tabel 4.7	Hasil pengujian dengan konversi pembacaan dalam kapasitansi untuk <i>stray capacitance</i> 174,3pF	77
Tabel 4.8	Hasil pengujian dengan konversi pembacaan dalam kapasitansi untuk <i>stray capacitance</i> 115,7pF	78
Tabel 4.9	Hasil pengukuran sensor kapasitif tanpa menggunakan Analog Front End untuk nilai <i>stray capacitance</i> = 236,6pF	80
Tabel 4.10	Hasil pengukuran sensor kapasitif tanpa menggunakan Analog Front End untuk nilai <i>stray capacitance</i> = 174,3pF	80
Tabel 4.11	Hasil pengukuran sensor kapasitif tanpa menggunakan Analog Front End untuk nilai <i>stray capacitance</i> = 115,7 pF	81
Tabel 4.12	Perbandingan hasil pengukuran untuk <i>stray capacitance</i> = 115,7pF	81

Tabel 4.13 Perbandingan hasil pengukuran untuk stray capacitance =
174,3 pF 82

Tabel 4.14 Perbandingan hasil pengukuran untuk stray capacitance =
236,6 pF 82

Tabel 4.15 Kondisi pengujian pembacaan sensor dengan larutan garam
NaCl 84

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur fisik sebuah kapasitor pelat sejajar	7
Gambar 2.2	Ilustrasi pengaruh kapasitansi parasitik kabel	9
Gambar 2.3	Ilustrasi <i>stray capacitance</i> pada papan sirkuit tercetak... 9	
Gambar 2.4	Pengaruh besar nilai <i>stray capacitance</i> pada sensor kelembaban kapasitif terhadap kesalahan pembacaan nilai kelembaban relatif.....	10
Gambar 2.5	Blok diagram sebuah <i>analog front end</i>	11
Gambar 2.6	Rangkaian penguat pembalik	11
Gambar 2.7	Rangkaian penguat pembalik dengan <i>T-network</i> pada <i>analog front end</i>	13
Gambar 2.8	Rangkaian ekivalen penguat pembalik dengan impedansi thevenin Z_{TH} dan tegangan thevenin V_{TH}	14
Gambar 2.9	Ilustrasi penskalaan impedansi pada penguat (efek miller)	16
Gambar 2.10	Skematik rangkaian pengali kapasitansi	17
Gambar 2.11	Rangkaian ekivalen pengali kapasitansi.....	18
Gambar 2.12	Rangkaian penguat pembalik beserta impedansi ekivalen dari rangkaian pengali kapasitansi, Z_3^1	19
Gambar 2.13	Rangkaian penguat instrumentasi	21
Gambar 2.14	Bagian penguat instrumentasi pada <i>analog front end</i>	23
Gambar 2.15	Diagram blok cara kerja rangkaian <i>analog front end</i>	24
Gambar 2.16	Skematik rangkaian <i>analog front end</i> berdasarkan	25
Gambar 2.17	Blok diagram internal IC ICL8038	27
Gambar 2.18	Rangkaian filter <i>low pass</i> pasif orde 1	29
Gambar 2.19	Rangkaian filter <i>low pass</i> - 40dB/dec	30
Gambar 2.20	Tampilan fisik <i>board</i> mikrokontroller STM32F4	32
Gambar 2.21	Ilustrasi prinsip kerja sebuah rangkaian demodulator sinkron	33
Gambar 2.22	Hubungan antar sinyal masukan dan sinyal referensi terhadap sinyal keluaran	33
Gambar 2.23	Skematik internal IC AD630.....	34
Gambar 2.24	Konfigurasi penguat pembalik pada IC AD630	35

Gambar 2.25	Konfigurasi tak pembalik penguat operasional pada IC AD630	35
Gambar 2.26	Internal IC MAX232CPE	37
Gambar 2.27	Tampilan perangkat BF-810 <i>USB to Serial Adapter</i>	38
Gambar 2.28	Tampilan fisik sebuah <i>plant growth chamber</i>	41
Gambar 2.29	Blok diagram sebuah sistem kontrol <i>loop</i> tertutup	42
Gambar 2.30	Ilustrasi cara kerja sebuah humidifier ultrasonik.....	43
Gambar 2.31	Tampilan fisik sebuah kipas ventilasi.....	43
Gambar 2.32	Rangkaian internal sebuah <i>Opto-Coupler SSR</i>	44
Gambar 3.1	Diagram blok alur kerja dari sistem	45
Gambar 3.2	Skematik rangkaian generator sinyal.....	47
Gambar 3.3	Skematik rangkaian filter <i>low pass</i> -40dB/dekade 2.5Hz	49
Gambar 3.4	Kurva perubahan kapasitansi sensor kapasitif HS1100 terhadap kelembaban relatif	50
Gambar 3.5	Tampilan fisik sensor kapasitif HS1100.....	52
Gambar 3.6	Skematik rangkaian demodulator sinkron menggunakan IC AD630	52
Gambar 3.7	Skematik rangkaian konverter <i>serial</i> ke RS232	54
Gambar 3.8	Tampilan fisik BF-810 konverter RS232 ke USB	55
Gambar 3.9	Diagram alir program menampilkan data <i>serial</i> ke grafik	57
Gambar 3.10	Skematik rangkaian penguat pembalik pada <i>analog front end</i>	59
Gambar 3.11	Skematik rangkaian pengali kapasitansi.....	60
Gambar 3.12	Rangkaian penguat instrumentasi dengan IC AD620....	61
Gambar 3.13	Diagram alir program kontroller	63
Gambar 3.14	Tampilan fisik <i>humidifier</i> ultrasonik	64
Gambar 3.15	Tampilan fisik kipas ventilasi.....	65
Gambar 3.16	Skematik rangkaian driver dengan menggunakan SSR. 66	
Gambar 3.17	Visualisasi 3D tampak depan dari desain <i>plant growth chamber</i>	68

Gambar 3.18	Visualisasi 3D tampak belakang dari desain <i>plant growth chamber</i>	68
Gambar 4.1	Hasil pengujian rangkaian generator sinyal	69
Gambar 4.2	Pengujian rangkaian rangkaian LPF -40dB/dec 2.5Hz .	70
Gambar 4.3	Grafik kesalahan pembacaan tegangan ADC STM32 terhadap tegangan aktual.....	73
Gambar 4.4	Grafik hubungan antara kapasitansi sensor terhadap tegangan keluaran dengan regresi linier untuk nilai <i>stray capacitance</i> 236,6pF	75
Gambar 4.5	Grafik hubungan antara kapasitansi sensor terhadap tegangan keluaran dengan regresi linier untuk nilai <i>stray capacitance</i> 174,3pF	76
Gambar 4.6	Grafik hubungan antara kapasitansi sensor terhadap tegangan keluaran dengan regresi linier untuk nilai <i>stray capacitance</i> 115,7pF	76
Gambar 4.7	Skematik rangkaian pengukuran tanpa <i>analog front end</i>	79
Gambar 4.8	Grafik hasil pengukuran kelembaban relatif larutan garam NaCl menggunakan sensor HS1101 dan Analog Front End	84
Gambar 4.9	Grafik hasil pengukuran kelembaban relatif larutan garam MgCl ₂ menggunakan sensor HS1101	84
Gambar 4.10	Realisasi <i>plant growth chamber</i> (tampak depan).....	85
Gambar 4.11	Bagian dalam <i>plant growth chamber</i> serta penempatan aktuator <i>humidifier</i> ultrasonik dan sensor kapasitif(tampak muka)	86
Gambar 4.12	Penempatan aktuator kipas ventilasi (tampak belakang)	86
Gambar 4.13	Penempatan perangkat akuisisi data dan <i>analog front end</i> (tampak atas)	87
Gambar 4.14	Posisi rangkaian <i>driver</i> dan catu daya pada bagian belakang <i>plant growth chamber</i>	87

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebuah sensor mengubah stimulus fisik atau elektrik menjadi sinyal elektrik. Sensor kapasitif merupakan jenis sensor yang mengubah stimulus fisik menjadi perubahan dalam besaran elektrik yaitu kapasitansi. Sensor kapasitif digunakan dalam berbagai aplikasi pengukuran, antara lain: perpindahan linier dan rotasional, tekanan, gaya, torsi, akselerasi, kelembaban relatif, temperatur, tingkat ketinggian fluida. Penggunaan sensor kapasitif dalam pengukuran memiliki kekurangan yaitu kesalahan akibat *stray capacitance* atau kapasitansi parasitik. *Stray capacitance* adalah kapasitansi yang tidak diinginkan dan seringkali tidak dapat dihindari yang timbul pada komponen, maupun rangkaian elektronik. Pada sensor kapasitif, nilai kapasitansi yang berubah terhadap stimulus yang diukur seringkali lebih kecil dibandingkan dengan *stray capacitance* yang ada. Akibatnya, *stray capacitance* atau kapasitansi parasitik lebih mendominasi dan terjadi kesalahan pembacaan stimulus yang diukur.

Dalam aplikasi pengaturan kelembaban, salah satu contohnya pada sebuah *plant growth chamber* yang merupakan ruangan dengan lingkungan terkendali untuk eksperimen biologi tanaman, salah satu spesifikasi yang diinginkan adalah pengaturan kelembaban dengan *setting point* yang stabil, sehingga didapatkan faktor lingkungan yang terkendali sesuai dengan nilai yang diinginkan, untuk menghasilkan eksperimen yang dapat direproduksi dan valid. Kesalahan hasil pengukuran dapat mempengaruhi *setting point* dari kontroller dan mengakibatkan *setting point* yang bergeser sehingga pengaturan kelembaban menjadi tidak optimal. Oleh karena itu pada aplikasi tersebut diperlukan implementasi *analog front end* yang dapat meminimalisir kesalahan akibat *stray capacitance*.

Penggunaan rangkaian jembatan kapasitansi[1] dapat meminimalisir terjadinya kesalahan, akan tetapi kelinierannya terbatas. IC *capacitance-to-digital converter* AD7747[2] memiliki fitur koreksi untuk *stray capacitance* akan tetapi rentang *stray capacitance* yang dapat dikoreksi terbatas. Rangkaian *capacitance-to-frequency converter* pada[3] tidak linier untuk nilai kapasitansi yang kecil sehingga pada tugas akhir ini diimplementasikan *analog front end* berdasarkan hasil penelitian pada[4] yang dapat mengoreksi *stray capacitance* dengan rentang yang

dapat disesuaikan. Hal ini diharapkan dapat meminimalkan kesalahan akibat *stray capacitance*, sehingga didapatkan hasil pengukuran yang reliabel dan valid.

Tugas akhir ini membahas tentang penerapan *analog front end* pada sensor kapasitif untuk mengoreksi kesalahan yang disebabkan oleh *stray capacitance*. *analog front end* merupakan rangkaian elektronika yang berperan dalam pengondisian sinyal dari sensor atau transduser yang bertujuan untuk mengondisikan sinyal agar sesuai dengan kriteria tertentu agar dapat diolah pada tahap berikutnya. *Analog front end* kemudian digunakan dalam pengukuran kelembaban relatif dengan sensor kapasitif yang diaplikasikan untuk pengaturan kelembaban relatif. Sensor kelembaban berbasis kapasitif HS1100 dieksitasi dengan sinyal AC pada frekuensi 10 KHz kemudian dikondisikan menggunakan *analog front end*. Sinyal AC keluaran dari *analog front end* dikonversi menjadi sinyal DC menggunakan demodulator sinkron dan filter *low pass*. Keluaran dari filter *low pass* diubah menjadi data digital menggunakan ADC (Analog to Digital Converter) di mikrokontroler STM32.

Data yang didapatkan dikirimkan dari mikrokontroler STM32 melalui komunikasi *serial* ke komputer untuk ditampilkan dalam bentuk grafik serta dievaluasi dengan membandingkan kesalahan hasil pembacaan akibat *stray capacitance* atau kapasitansi parasitik untuk sensor yang menggunakan *analog front end* dengan sensor yang tidak menggunakan *analog front end*. Kelembaban relatif didapatkan dari kalibrasi hasil pembacaan nilai kapasitansi sensor pada kondisi nilai RH yang diketahui dengan menggunakan larutan garam tersaturasi (*Saturated Salt Solution*). Nilai yang didapatkan akan dibandingkan dengan *set-point* nilai kelembaban relatif sehingga dihasilkan nilai galat. Nilai galat diproses oleh kontroler yang direalisasikan di mikrokontroler STM32 sehingga menghasilkan sinyal kontrol untuk menyalakan atau mematikan aktuator berupa *humidifier* ultrasonik dan kipas ventilasi yang digunakan untuk mengatur kelembaban di dalam sebuah ruangan. Sebagai *plant* dari sistem pengaturan kelembaban digunakan ruangan *growth chamber*. Respon hasil pengaturan kemudian dianalisa untuk melihat pengaruh implementasi *analog front end* pada hasil pengaturan kelembaban, yaitu ketepatan nilai kelembaban relatif yang dicapai dalam ruangan relatif terhadap nilai *set-point* kelembaban.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana meminimalisir kesalahan akibat *stray capacitance* pada sensor kapasitif ?
2. Bagaimana merancang sistem akuisisi data sinyal analog ?
3. Bagaimana merancang sistem pengaturan kelembaban relatif ?
4. Bagaimana pengiriman data dari mikrokontroller STM32 ke komputer ?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

1. Mampu mengimplementasikan *analog front end* yang mampu meminimalisir kesalahan akibat *stray capacitance*.
2. Mampu mengubah sinyal keluaran *analog front end* menjadi sinyal digital.
3. Mampu merancang kontroller untuk mengatur kelembaban relatif.
4. Mampu mengirimkan data melalui komunikasi *serial* dari mikrokontroller STM32 ke komputer

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. *Stray capacitance* berupa kabel yang menghubungkan sensor dengan rangkaian.
2. Nilai kapasitansi kabel sudah diketahui terlebih dahulu.
3. Panjang kabel 2 Meter, 1.5 Meter, 1 Meter.
4. Jenis kabel yaitu kabel audio merk Canare tipe L-2T2S
5. *Plant growth chamber* memiliki dimensi 40cm x 40cm x 40cm

1.5 Metodologi Penelitian

Langkah-langkah yang dikerjakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dasar teori yang menunjang dalam penulisan Tugas Akhir. Dasar teori ini dapat

diambil dari buku-buku, jurnal, proceeding, dan artikel-artikel di internet.

2. Perancangan Sistem

Setelah mempelajari literatur yang ada, selanjutnya dilakukan perancangan sistem. Sistem yang akan dirancang meliputi: *analog front end* dan sistem akuisisi data(generator sinyal, filter *low pass*, demodulator sinkron, sensor kapasitif, ADC STM32, konverter *serial* ke RS232), komunikasi *serial* dari mikrokontroler STM32 ke komputer, *driver*, kontroller.

3. Pengujian Sistem

Pada tugas akhir ini dilakukan beberapa pengujian, yaitu :

1. Pengujian sistem akuisisi data yang meliputi :
 - Pengujian rangkaian generator sinyal
 - Pengujian rangkaian filter *low pass*
 - Pengujian pembacaan ADC mikrokontroller STM32
2. Pengujian Analog Front End dan sistem akuisisi data.
 - Pengujian kompensasi *stray capacitance*
 - Pengujian pengukuran sensor kapasitif tanpa menggunakan *analog front end*
 - Kalibrasi pengukuran kelembaban relatif dengan implementasi *analog front end*
 - Realisasi desain *plant growth chamber*
3. Pengujian sistem pengaturan kelembaban relatif

4. Analisa Data

Analisa dilakukan terhadap hasil dari pengujian yang telah diperoleh untuk memastikan perangkat elektronik telah bekerja sesuai dengan kriteria yang telah dirancang.

5. Penulisan Laporan Tugas Akhir

Tahap ini adalah tahapan terakhir dari proses pengerjaan tugas akhir ini. Tahap ini dimulai saat pengambilan data. Laporan tugas akhir ini berisi tentang semua kegiatan yang dilakukan selama mengerjakan tugas akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir ini terdiri dari lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

➤ **BAB I : PENDAHULUAN**

Bab ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, sistematika penulisan, metodologi, dan relevansi.

➤ **BAB II : TEORI PENUNJANG**

Bab ini menjelaskan tentang teori-teori penunjang dalam pengerjaan tugas akhir ini yang meliputi sensor kapasitif, *analog front end*, sistem akuisisi data, kelembaban relatif, *growth chamber*, kontroller proposional, dan aktuator.

➤ **BAB III: PERANCANGAN SISTEM**

Bab ini menjelaskan sistem yang dirancang antara lain: *analog front end* dan sistem akuisisi data(generator sinyal, filter *low pass*, demodulator sinkron, sensor kapasitif, ADC STM32, konverter *serial* ke RS232), komunikasi *serial* dari mikrokontroler STM32 ke komputer, *driver*, kontroller, dan *plant growth chamber*.

➤ **BAB IV : PENGUJIAN DAN ANALISIS**

Bab ini menjelaskan data yang didapat dari pengujian keseluruhan sistem beserta analisisnya.

➤ **BAB V : PENUTUP**

Bagian ini merupakan bagian akhir yang berisikan kesimpulan yang diperoleh dari pembuatan Tugas Akhir ini, serta saran-saran untuk pengembangannya.

1.7 Relevansi dan Manfaat

Mata kuliah yang mendukung tugas akhir ini adalah Sensor dan Aktuator, Teknik Akuisisi Data, Sistem Elektronika Tertanam, Perancangan Sistem Elektronika Analog, Sistem Kontrol Elektronika Sistem Mikroprosesor dan Mikrokontroller. Hasil dari tugas akhir ini diharapkan dapat menjadi pendukung penelitian pada bidang studi elektronika dalam instrumentasi dan pengukuran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Dasar Teori

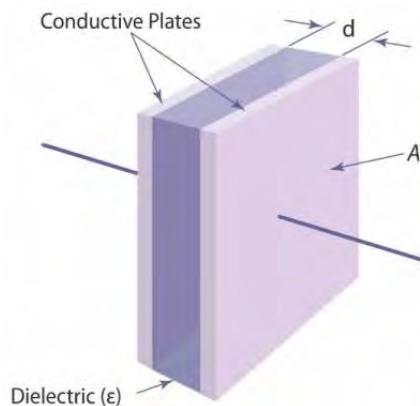
Pada sub bab ini akan dibahas tentang beberapa hal yaitu, sensor kapasitif, *analog front end*, sistem akuisisi data, kelembaban relatif, kontroller, komunikasi *serial* dan aktuator.

2.1.1 Sensor Kapasitif

Sebuah kapasitor terdiri dari dua pelat konduktor yang dipisahkan oleh sebuah dielektrik(padat, cair atau gas) atau hampa udara. Kapasitansi (C) adalah hubungan antara jumlah muatan (Q) dan perbedaan tegangan (V) antara dua pelat konduktor pada kapasitor, $C/Q = V$. Kapasitansi ini bergantung pada penyusunan geometris dari pelat konduktor dan material dielektrik diantaranya. Contoh, sebuah kapasitor yang terdiri dari n pelat sejajar dengan luasan A , memiliki jarak d diantara kedua pelat dan konstanta material dielektrik ϵ_r memiliki kapasitansi :

$$C \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} (n - 1) \quad (2.1)$$

ϵ_0 = konstanta dielektrik untuk ruang hampa



Gambar 2.1 Struktur fisik sebuah kapasitor pelat sejajar[5]

maka stimulus atau fenomena fisik yang menghasilkan perubahan ϵ_r , A , atau d akan menghasilkan perubahan nilai kapasitansi C dan dapat dideteksi oleh kapasitor tersebut.

Sensor kapasitif dapat bersifat linier atau non linier, tergantung dari parameter yang berubah, apakah impedansi atau admitansi. Pada sebuah kapasitor pelat sejajar contohnya, keluaran sensor kapasitif linier ketika parameter yang diukur adalah admitansi(proporsional terhadap C) ketika ϵ_r atau A berubah, namun non-linier ketika stimulus yang dideteksi mengubah jarak antar pelat, baik itu dalam bentuk $C \approx \epsilon (A/z)$ atau $C \approx \epsilon(A/(d + z))$. Untuk kasus ini, persamaan kapasitansi dari sensor adalah:

$$C \approx \epsilon \frac{A}{(d+z)} \quad (2.2)$$

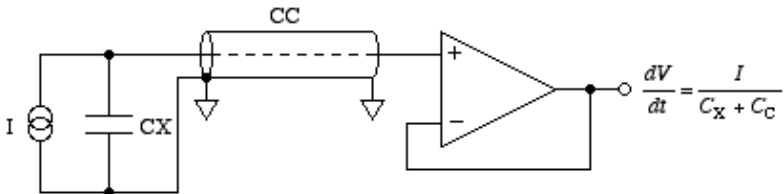
dimana $x = z/d$. Dengan menurunkan persamaan ini untuk menemukan sensitivitasnya, didapatkan :

$$\frac{dC}{dz} = \frac{-\epsilon A}{d^2(1+x)^2} = \frac{-\epsilon C_0}{d^2(1+x)^2} \approx -\frac{C_0}{d} (1 - 2x + 3x^2 - 4x^3 + \dots) \quad (2.3)$$

Sehingga sensor bersifat nonlinier karena sensitivitasnya tidak konstan, melainkan bergantung pada z dan naik ketika d dan z kecil. Untuk sensor dengan karakteristik kapasitansi $C = \epsilon(A/z)$ sensitivitasnya adalah $-\epsilon(A/z^2)$ yang juga nonlinier[1].

Sensor kapasitif memiliki impedansi input yang tinggi. Impedansi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kesalahan akibat pembebanan pada rangkaian pengondisi sensor, sehingga dibutuhkan sumber eksitasi AC dengan frekuensi tinggi(1kHz-100MHz) untuk mendapatkan nilai impedansi input yang tidak terlalu tinggi. Untuk menghindari interferensi kapasitif karena impedansinya yang tinggi, dan pada aplikasi yang membutuhkan sensor ditempatkan pada lokasi yang jauh, sensor kapasitif seringkali dihubungkan menggunakan kabel yang memiliki *shield*. Kabel ini memiliki *stray capacitance* yang dapat mengganggu pembacaan sensor. Solusi yang memungkinkan adalah menempatkan rangkaian pengondisi sinyal didekat sensor, dan menggunakan trafo impedans, namun untuk aplikasi yang memerlukan sensor ditempatkan pada lokasi yang jauh, dan membutuhkan penghubung kabel ke rangkaian pengondisi sinyal, kedua hal ini tidak dapat diterapkan. Untuk itu diperlukan solusi lain yang mampu mengatasi permasalahan ini.

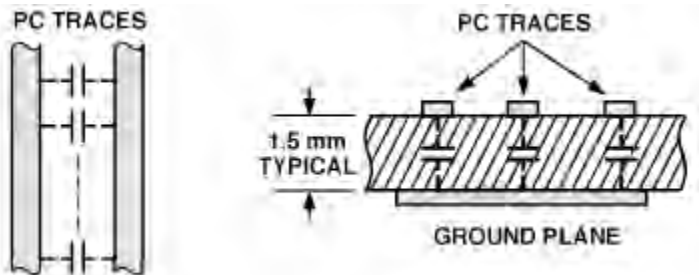
2.1.1.1 Stray Capacitance



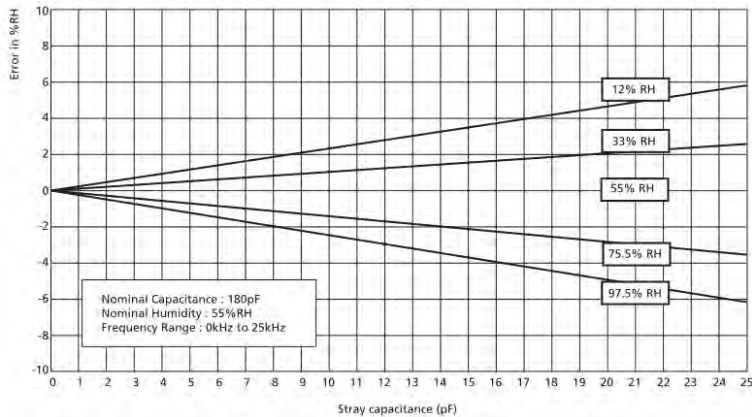
Gambar 2.2 Ilustrasi pengaruh kapasitansi parasitik kabel [6]

Stray capacitance atau kapasitansi parasitik adalah kapasitansi yang tidak diinginkan atau seringkali tidak dapat dihindari yang timbul pada komponen, maupun rangkaian elektronik. *Stray capacitance* muncul apabila terdapat dua konduktor yang berdekatan satu sama lain, terlebih lagi apabila keduanya paralel satu sama lain, dan tidak di-*short* atau diselubungi dengan sebuah konduktor yang berfungsi sebagai *shield*[7].

Stray capacitance atau kapasitansi parasitik juga umumnya timbul pada dua jalur yang paralel pada papan sirkuit tercetak, atau diantara jalur/*planes* pada sisi papan sirkuit yang berlawanan. Pada sensor kapasitif, kapasitansi C_x yang berubah terhadap kuantitas yang diukur seringkali lebih kecil dibandingkan dengan *stray capacitance* nya, terutama ketika sensor letaknya jauh dari rangkaian akuisisi data dan dihubungkan oleh kabel dengan panjang tertentu. Tiap kabel memiliki kapasitansi parasitik yang nilainya proporsional terhadap panjang kabel. Semakin panjang kabel, maka kapasitansi parasitiknya semakin besar.



Gambar 2.3 Ilustrasi *stray capacitance* pada papan sirkuit tercetak[6]

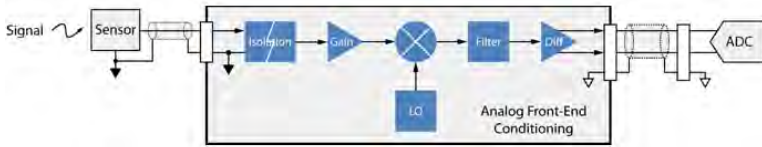


Gambar 2.4 Pengaruh besar nilai *stray capacitance* pada sensor kelembaban kapasitif terhadap kesalahan pembacaan nilai kelembaban relatif[7]

Kapasitansi parasitik ini mempengaruhi nilai kapasitansi sensor karena bertindak sebagai kapasitansi yang paralel terhadap kapasitansi sensor C_x sehingga kapasitansi total sensor menjadi $C_x + C_s$ dimana C_s merupakan *stray capacitance* dari kabel. Akibat dari kapasitansi parasitik ini, keluaran dari sebuah rangkaian pengondisi sinyal untuk sebuah sensor kapasitif akan memiliki komponen $f(C_x)$ dan $f(C_s)$, akibat dari C_x dan C_s . Pada banyak aplikasi, $f(C_x) \ll f(C_s)$, sehingga menghasilkan perubahan keluaran yang kecil, relatif terhadap nilai C_x tapi dengan *offset* yang besar pada keluaran, yang jelas tidak diinginkan[4].

$$\text{Keluaran} = f(C_x) + f(C_s) \quad (2.4)$$

2.1.2 Analog Front End

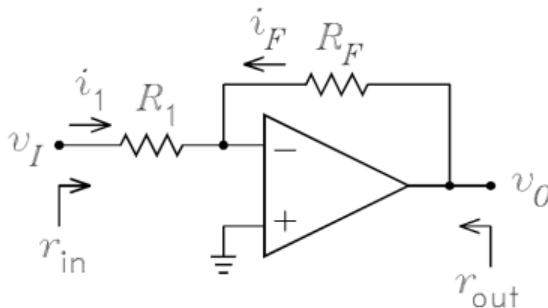


Gambar 2.5 Blok diagram sebuah *analog front end*[8]

Analog front end merupakan rangkaian elektronika yang berperan dalam pengondisian sinyal dari sensor atau transduser agar selanjutnya dapat diolah pada tahap berikutnya. Sebuah *analog front end* dapat meliputi rangkaian yang melakukan fungsi isolasi, penguatan, *mixing*, filtering dan fungsi – fungsi lain yang bertujuan untuk mengondisikan sinyal agar sesuai dengan kriteria yang diinginkan untuk akuisisi data.

Pada sensor kapasitif, adanya *stray capacitance* atau kapasitansi parasitik pada sensor dapat menyebabkan terjadinya kesalahan atau galat. Untuk mengatasi hal tersebut diimplementasikan *Analog Front End* berdasarkan hasil penelitian pada[4]. *Analog front end* ini terdiri dari beberapa rangkaian yaitu penguat pembalik, pengali kapasitansi dan penguat instrumentasi.

2.1.2.1 Penguat Pembalik



Gambar 2.6 Rangkaian penguat pembalik[9]

Gambar 2.6 merupakan skematik rangkaian penguat pembalik. V_I merupakan masukan sinyal yang masuk melalui resistor R_I menuju masukan pembalik dari penguat operasional. Resistor R_F merupakan resistor umpan balik yang menghubungkan keluaran penguat operasional ke masukan pembalik dari penguat operasional. Rangkaian ini disebut penguat pembalik karena penguatan tegangan yang dihasilkan negatif, dimana tegangan masukan positif akan menghasilkan keluaran yang negatif, dan juga sebaliknya, tegangan masukan negatif akan menghasilkan keluaran yang positif. Hal ini berlaku untuk sinyal DC maupun AC dimana pada sinyal AC terjadi pembalikan fasa 180° pada sinyal keluaran terhadap sinyal masukan.

Pada gambar 2.6, tegangan pada masukan pembalik penguat operasional (V_-) = $-V_O/A$ dimana A adalah impedansi input dari penguat operasional. Sebuah penguat operasional memiliki impedansi input (A) yang sangat besar. Untuk V_O berhingga, dan A mendekati tak hingga, maka V_- mendekati nol. Meskipun V_- tidak di-*ground*-kan V_- merupakan virtual *ground* karena tegangannya ≈ 0 . Karena $i_- = 0$ sesuai dengan hukum kirchoff arus, maka jumlah arus yang masuk ke titik V_- melalui resistor R_I dan R_F sama dengan 0, sehingga :

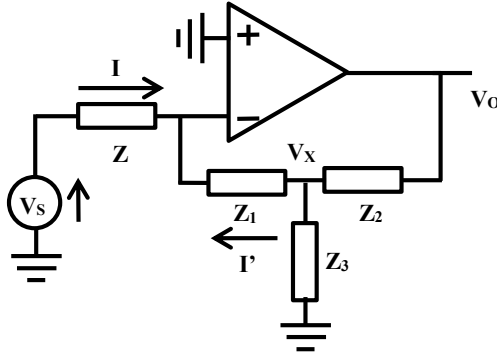
$$i_1 + i_F = 0 \quad (2.5)$$

$i_1 = V_I/R_I$ dan $i_F = V_O/R_F$, sehingga dari persamaan 2.5 didapatkan :

$$\frac{V_I}{R_I} + \frac{V_O}{R_F} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{V_O}{R_F} = -\frac{V_I}{R_I} \quad (2.7)$$

$$V_O = -\frac{R_F}{R_I} \cdot V_I \quad (2.8)$$



Gambar 2.7 Rangkaian penguat pembalik dengan *T-network* pada *analog front end*[4]

Rangkaian pada gambar 2.7 merupakan rangkaian penguat pembalik dengan menggunakan *T-network* pada *loop* umpan balik untuk mendapatkan resistansi umpan balik yang tinggi menggunakan resistor yang nilainya relatif kecil. V_s merupakan sumber tegangan eksitasi AC dengan frekuensi dan amplitudo konstan. Penguat ini digunakan pada rangkaian *analog front end* untuk menempatkan sensor kapasitif diletakkan pada Z_3 dibagian *T-network* sehingga perubahan impedansi sensor akan mengubah nilai resistansi umpan balik dari penguat pembalik, dan didapatkan tegangan keluaran penguat yang berubah secara proporsional terhadap impedansi dari sensor. Dari gambar 2.7 didapatkan persamaan awal :

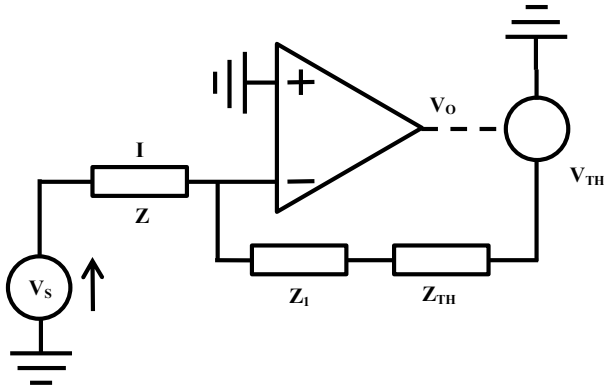
$$I = \frac{V_s}{Z} \quad (2.9)$$

Karena masukan pembalik pada penguat operasional merupakan *virtual ground*, sesuai dengan hukum kirchoff arus, maka jumlah arus yang masuk ke titik masukan penguat operasional melalui Z dan Z pada umpan balik sama dengan 0, sehingga :

$$I + I' = 0 ; I' = -I \quad (2.10)$$

$$V_X = -I \cdot Z_{Z1} \quad (2.11)$$

$$V_X = -\frac{V_s}{Z} \cdot Z_1 \quad (2.12)$$



Gambar 2.8 Rangkaian ekuivalen penguat pembalik dengan impedansi thevenin Z_{TH} dan tegangan thevenin V_{TH} [4]

Untuk menyederhanakan rangkaian, Z_2 , Z_3 dapat diganti dengan rangkaian ekuivalen theveninnya, yang terdiri dari Z_{TH} dan V_{TH} dari gambar 2.8 didapatkan :

$$Z_{TH} = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (2.13)$$

$$V_{TH} = V_O \cdot \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (2.14)$$

$$V_{TH} = - \frac{Z_1 + Z_{TH}}{Z} \cdot V_S \quad (2.15)$$

Persamaan 2.14 disubstitusi ke 2.15 sehingga :

$$V_O \cdot \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} = - \frac{Z_1 + Z_{TH}}{Z} \cdot V_S \quad (2.16)$$

$$V_O = - \left(\frac{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}}{Z} \cdot \frac{Z_3 + Z_2}{Z_3} \right) \cdot V_S \quad (2.17)$$

$$V_O = - \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_3 + Z_2 \cdot Z_3}{Z \cdot Z_3} \right) \cdot V_S \quad (2.18)$$

$$V_o = - \left(\frac{\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3} + Z_1 + Z_2}{Z} \right) \cdot V_s \quad (2.19)$$

Z_3 merupakan impedansi ekuivalen dari sensor kapasitif, dimana :

$$Z_3 = \frac{1}{j\omega(C_{os}+C_X)} \quad (2.20)$$

C_{os} merupakan *stray capacitance* dan C_X merupakan kapasitansi dari sensor, sehingga didapatkan persamaan tegangan keluaran penguat pembalik (V_o) yaitu :

$$V_o = - \left(\frac{\frac{Z_1 \cdot Z_2}{\frac{1}{j\omega(C_{os}+C_X)}} + Z_1 + Z_2}{Z} \right) \cdot V_s \quad (2.21)$$

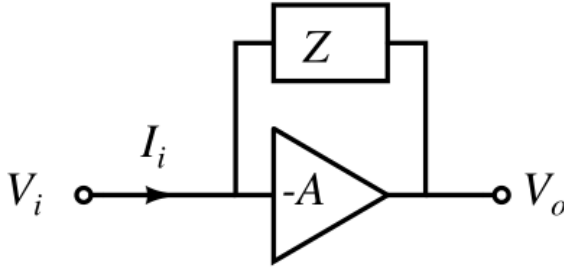
$$V_o = - \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot j\omega(C_{os}+C_X) + Z_1 + Z_2}{Z} \right) \cdot V_s \quad (2.22)$$

Pada persamaan 2.25, dapat diamati pengaruh *stray capacitance* C_{os} pada keluaran penguat pembalik. Jika perubahan nilai *stray capacitance* ini lebih besar dari perubahan nilai kapasitansi sensor, maka pada keluaran penguat, tegangan keluaran akan dipengaruhi oleh perubahan akibat C_{os} dan perubahan akibat C_X tidak terdeteksi. Dibutuhkan rangkaian untuk mengompensasi nilai C_{os} sehingga didapatkan respon perubahan tegangan akibat perubahan dari nilai C_X saja.

2.1.2.2 Pengali Kapasitansi

Rangkaian pengali kapasitansi adalah sebuah rangkaian elektronika yang menggunakan kapasitor dengan nilai kapasitansi yang relatif kecil untuk menghasilkan kapasitansi efektif yang lebih besar. Rangkaian pengali kapasitansi pada *Analog Front End* ini bekerja berdasarkan efek Miller.

Impedansi input efektif dari sebuah penguat bergantung pada impedansi yang terhubung dari input ke output dari penguat tersebut. Penskalaan impedansi ini seringkali mendominasi impedansi input dan respon frekuensi dari penguat. Penskalaan impedansi ini dikenal juga dengan nama efek Miller[10].



Gambar 2.9 Ilustrasi penskalaan impedansi pada penguat (efek miller)[10]

Dari gambar 2.9 didapatkan persamaan miller masukan:

$$I_i = \frac{V_i - V_o}{Z} \quad (2.23)$$

$$V_o = -A \cdot V_i \quad (2.24)$$

Substitusi persamaan 2.24 ke persamaan 2.23 :

$$I_i = \frac{V_i + A \cdot V_i}{Z} = V_i \cdot \left(\frac{1+A}{Z} \right) \quad (2.25)$$

$$Z_{in} = \frac{V_i}{I_i} = \frac{Z}{1+A} \quad (2.26)$$

Sedangkan persamaan miller keluaran dapat dirumuskan dengan :

$$Z_{out} = \frac{V_o}{I_o} \quad (2.27)$$

$$-I_o = I_i \quad (2.28)$$

$$Z_{out} = \frac{-A \cdot V_i}{-\frac{V_i + A \cdot V_i}{Z}} \quad (2.29)$$

$$Z_{out} = Z \cdot \frac{-A \cdot V_i}{-(V_i + A \cdot V_i)} \quad (2.30)$$

$$Z_{out} = Z \cdot \frac{-A \cdot V_i}{-V_i(1+A)} \quad (2.31)$$

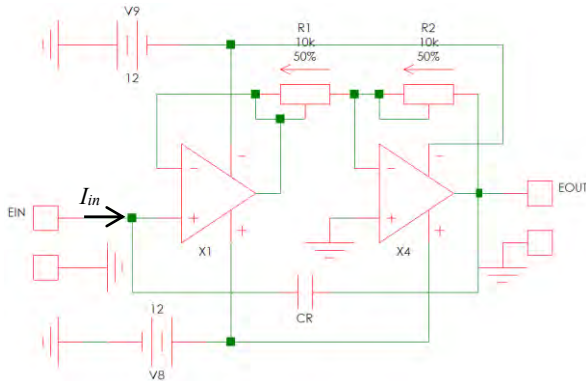
$$Z_{out} = Z \cdot \frac{A}{1+A} \quad (2.32)$$

Sehingga sebuah resistor atau induktor yang terhubung dari masukan ke keluaran dari penguat, pada masukan dari penguat akan mengalami penskalaan impedansi akibat miller masukan sebesar $(1 + \text{penguatan})$ kali lebih kecil dan sebuah kapasitor akan mengalami penskalaan impedansi pada input penguat sebesar $(1 + \text{penguatan})$ kali lebih besar.

Gambar 2.10 merupakan rangkaian *pengali kapasitansi* yang diimplementasikan pada *analog front end*. C_R merupakan kapasitor referensi yang nilainya diketahui. Tujuan dari penggunaan rangkaian pengali kapasitansi yaitu untuk mendapatkan kapasitansi variabel untuk men-set agar C_{efektif} dari rangkaian pengali kapasitansi = C_{os} . Persamaan masukan - keluaran dari gambar 2.10 adalah :

$$I_{in} = \frac{e_{in} - e_{out}}{\frac{1}{j\omega C_R}} \quad (2.33)$$

$$e_{out} = \left(-e_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.34)$$



Gambar 2.10 Skematik rangkaian pengali kapasitansi[4]

Dari substitusi persamaan 2.34 ke 2.33 didapatkan:

$$I_{in} = \frac{e_{in} + \left(e_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1}\right)}{\frac{1}{j\omega C_R}} = \frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e_{in}}{\frac{1}{j\omega C_R}} \quad (2.35)$$

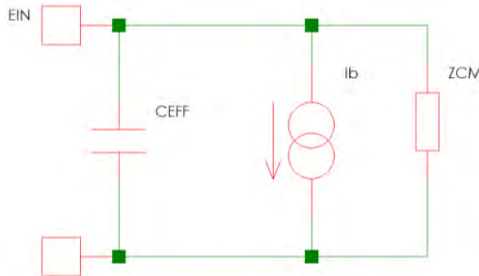
Impedansi masukan pada rangkaian pengali kapasitansi (Z_{in}) merupakan hasil penskalaan akibat miller masukan. $Z_{in} = e_{in}/I_{in}$ sehingga nilai impedansi pada masukan rangkaian pengali kapasitansi akan sama dengan nilai impedansi akibat $C_{efektif}$.

$$I_{in} = \frac{e_{in}}{\frac{1}{j\omega C_{efektif}}} \quad (2.36)$$

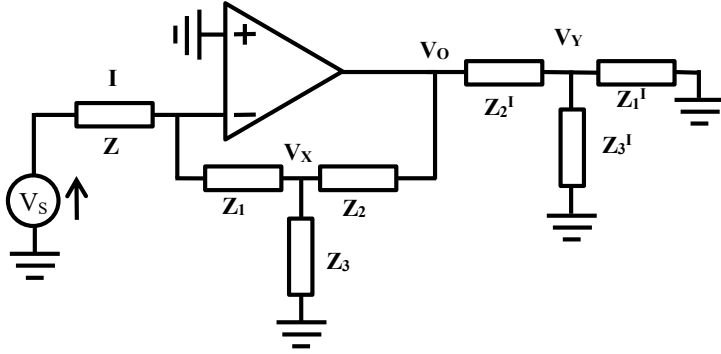
Dengan mensubstitusi persamaan 2.30 ke 2.31 didapatkan nilai $C_{efektif}$:

$$C_{efektif} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot C_R \quad (2.37)$$

Pada masukan dari pengali kapasitansi, nilai C_R akan tampak mengalami penskalaan, menjadi nilai $C_{efektif}$. Penskalaan nilai kapasitansi ini diakibatkan dari penskalaan nilai impedansi akibat efek miller pada masukan penguat. Rangkaian pengali kapasitansi pada gambar 2.10 dapat di ganti dengan rangkaian ekuivalennya yang terdiri dari $C_{efektif}$, impedansi rangkaian penguat kapasitansi (Z_{CM}) dan sebuah sumber arus. Sumber arus ini menyatakan perubahan arus yang melewati rangkaian penguat kapasitansi akibat adanya penskalaan impedansi.



Gambar 2.11 Rangkaian ekivalen pengali kapasitansi[10]



Gambar 2.12 Rangkaian penguat pembalik beserta impedansi ekivalen dari rangkaian pengali kapasitansi, Z_3^I [4]

Untuk mengompensasi keluaran dari penguat pembalik yang terganggu oleh *stray capacitance* (C_{OS}), digunakan rangkaian kompensator berupa *T-network* yang identik dengan *T-network* pada bagian umpan balik penguat pembalik(gambar 2.7), yang terdiri dari Z_2^I , Z_1^I dan Z_3^I . Gambar 2.12 merupakan rangkaian penguat pembalik yang terhubung dengan rangkaian kompensator. Impedansi Z_3^I pada gambar 2.12 diimplementasikan dengan rangkaian pengali kapasitansi.

$$Z_P' = \frac{Z_1' \cdot Z_3'}{Z_1' + Z_3'} \quad (2.38)$$

$$V_Y = \frac{Z_P'}{Z_P' + Z_2'} \cdot V_O \quad (2.39)$$

Substitusi persamaan 2.22 ke persamaan 2.39 didapatkan :

$$V_Y = - \frac{Z_P'}{Z_P' + Z_2'} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot J\omega(C_{OS} + C_X) + Z_1 + Z_2}{Z} \right) \cdot V_S \quad (2.40)$$

$$V_Y = - \frac{\frac{Z_1' \cdot Z_3'}{Z_1' + Z_3'}}{\frac{Z_1' \cdot Z_3'}{Z_1' + Z_3'} + Z_2'} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot J\omega(C_{OS} + C_X) + Z_1 + Z_2}{Z} \right) \cdot V_S \quad (2.41)$$

$$Z_3' = \frac{1}{j\omega C_{efektif}} \quad (2.42)$$

Dimana $C_{efektif}$ merupakan kapasitansi efektif rangkaian pengali kapasitansi yang dihasilkan dari penskalaan nilai kapasitansi C_R . Dengan mensubstitusi persamaan 2.42 ke persamaan 2.41 maka :

$$V_Y = - \frac{\frac{Z_1' \cdot \frac{1}{j\omega C_{efektif}}}{Z_1' + \frac{1}{j\omega C_{efektif}}}}{\frac{1}{j\omega C_{efektif}} + Z_2'} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot j\omega(C_{OS} + C_X) + Z_1 + Z_2}{Z} \right) \cdot V_S \quad (2.43)$$

$$V_Y = - \frac{\frac{Z_1'}{Z_1' \cdot j\omega C_{efektif} + 1}}{\frac{Z_1'}{Z_1' \cdot j\omega C_{efektif} + 1} + Z_2'} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot j\omega(C_{OS} + C_X) + Z_1 + Z_2}{Z} \right) \cdot V_S \quad (2.44)$$

$$V_Y = - \frac{Z_1'}{Z_1' + Z_2' + Z_1' \cdot Z_2' \cdot j\omega C_{efektif}} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot j\omega(C_{OS} + C_X) + Z_1 + Z_2}{Z} \right) \cdot V_S \quad (2.45)$$

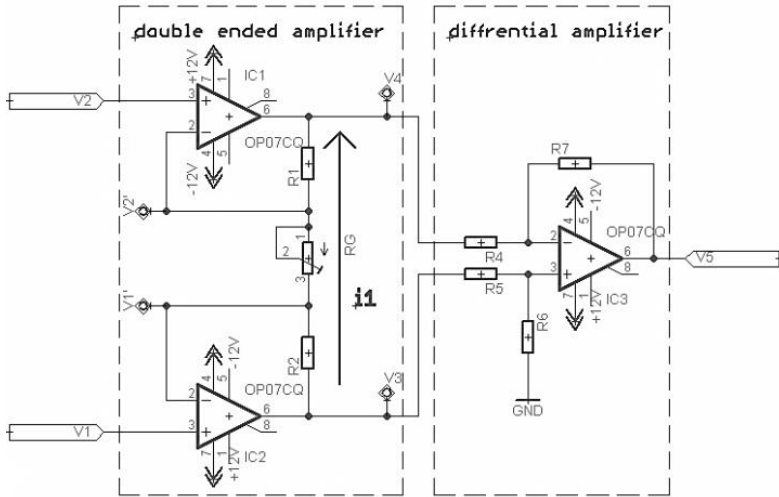
$$V_Y = - \frac{V_S \cdot Z_1'}{Z} \cdot \frac{Z_1 + Z_2 + Z_1 \cdot Z_2 \cdot j\omega(C_{OS} + C_X)}{Z_1' + Z_2' + Z_1' \cdot Z_2' \cdot j\omega C_{efektif}} \quad (2.46)$$

Rangkaian kompensator *T-network* pada keluaran penguat pembalik identik dengan *T-network* pada *loop* umpan balik penguat pembalik sehingga nilai $Z_1 = Z_1'$; $Z_2 = Z_2'$ maka didapatkan persamaan tegangan pada titik V_Y :

$$V_Y = - \frac{V_S \cdot Z_1'}{Z} \cdot \frac{Z_P^* \cdot j\omega(C_{OS} + C_X)}{Z_P^* \cdot j\omega C_{efektif}} \quad (2.47)$$

Dengan nilai $Z_P^* = Z_P' = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$. Dengan adanya rangkaian kompensator pada keluaran penguat pembalik, pada persamaan 2.47 didapatkan komponen $C_{efektif}$ yang nilainya berbanding terbalik dengan nilai kapasitansi $C_{OS} + C_X$. Untuk menghilangkan C_{OS} pada pembilang persamaan 2.47, $C_{efektif}$ harus memiliki nilai yang sama dengan C_{OS} .

2.1.2.3 Penguat Instrumentasi



Gambar 2.13 Rangkaian penguat instrumentasi [11]

Penguat instrumentasi merupakan penguat diferensial dengan impedansi masukan yang tinggi dan keluaran tunggal. Penguatan instrumentasi umumnya digunakan untuk memperkuat sinyal diferensial yang sangat kecil. Penguat diferensial biasa memiliki penguatan *loop* tertutup yang ditentukan oleh umpan balik resistif eksternal yang terhubung antara terminal keluaran dan satu terminal masukan, baik positif atau negatif. Sedangkan penguat instrumentasi memiliki resistor umpan balik internal yang efektif terisolasi dari terminal masukan sebagai sinyal masukan yang diterapkan di dua masukan diferensial, V_1 dan V_2 .

Rangkaian penguat instrumentasi terdiri dari rangkaian *double ended amplifier* dan rangkaian penguat diferensial. Untuk menganalisa rangkaian pada gambar 2.13 diasumsikan tegangan V_1 lebih positif dari V_2 . Karena adanya karakteristik *virtual ground* pada penguat operasional, maka $V_1' = V_1$ dan $V_2' = V_2$. Adanya beda potensial antara V_1 dan V_2 menimbulkan arus i_1 yang mengalir antara V_3 dan V_4 , sehingga didapatkan persamaan:

$$i1 = \frac{V1-V2}{RG} \quad (2.48)$$

$$V3 - V4 = i1 (R1 + R2 + RG) \quad (2.49)$$

Dari substitusi persamaan (2.48) ke persamaan (2.49), didapatkan persamaan :

$$\frac{V3-V4}{V1-V2} = \frac{R1+R2+RG}{RG} \quad (2.50)$$

Jika nilai $R1 = R2 = R$, maka persamaan (2.50) menjadi :

$$\frac{V3-V4}{V1-V2} = \frac{2R}{RG} + 1 \quad (2.51)$$

keluaran dari rangkaian *double ended amplifier* merupakan masukan dari rangkaian penguat differensial, persamaan pada penguat differensial adalah:

$$V5 = \frac{V5}{V3} + \frac{V5}{V4} \quad (2.52)$$

$$\frac{V5}{V3} = \left(\frac{R7}{R4} + 1 \right) \times \left(\frac{R6}{R5+R6} \times V3 \right) \quad (2.53)$$

$$\frac{V5}{V4} = - \left(\frac{R7}{R4} \times V4 \right) \quad (2.54)$$

Dari substitusi persamaan (2.53) dan (2.54), ke persamaan (2.52) didapatkan:

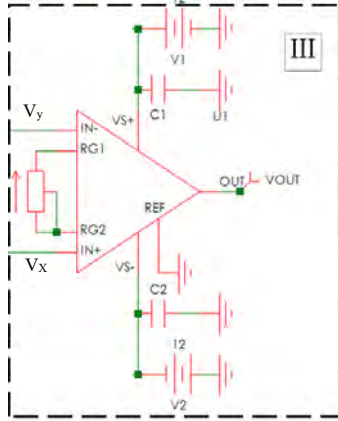
$$V5 = \left[\left(\frac{R7}{R4} + 1 \right) \times \left(\frac{R6}{R5+R6} \times V3 \right) \right] - \left[\frac{R7}{R4} \times V4 \right] \quad (2.55)$$

Jika $R4=R5=R7=R$, maka persamaan (2.55) menjadi:

$$V5 = V3 - V4 \quad (2.56)$$

Persamaan (2.56) kembali disubstitusikan dengan persamaan (2.51) sehingga didapatkan persamaan tegangan keluaran ($V5$) :

$$V5 = \left(\frac{2R}{RG} + 1 \right) \times (V1 - V2) \quad (2.57)$$



Gambar 2.14 Bagian penguat instrumentasi pada *analog front end*[4]

Bagian terakhir dari rangkaian Analog Front End ini adalah sebuah rangkaian penguat instrumentasi. Tegangan pada titik V_X (gambar 2.7) dan V_Y (gambar 2.12) masuk ke masukan pembalik dan masukan tak pembalik dari penguat instrumentasi. G merupakan penguatan dari penguat instrumentasi sehingga tegangan keluaran (V_O) dari penguat instrumentasi adalah :

$$V_O = G \cdot (V_X - V_Y) \quad (2.58)$$

Substitusi nilai V_X dari persamaan 2.12 dan nilai V_Y dari persamaan 2.47 ke persamaan 2.58 :

$$V_O = G \cdot \left(\left(-\frac{V_S}{Z} \cdot Z_1 \right) - \left(-\frac{V_S \cdot Z_1'}{Z} \cdot \frac{Z_1 + Z_2 + Z_1 \cdot Z_2 \cdot J\omega(C_{OS} + C_X)}{Z_1' + Z_2' + Z_1' \cdot Z_2' \cdot J\omega C_{efektif}} \right) \right) \quad (2.59)$$

$$V_O = G \cdot \left(\frac{-V_S \cdot Z_1 \cdot (Z_1' + Z_2' + Z_1' \cdot Z_2' \cdot J\omega C_{efektif}) + V_S \cdot Z_1' \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_1 \cdot Z_2 \cdot J\omega C_{OS}) + Z_1 \cdot Z_2 \cdot J\omega C_X}{Z \cdot (Z_1' + Z_2' + Z_1' \cdot Z_2' \cdot J\omega C_{efektif})} \right) \quad (2.60)$$

Berdasarkan persamaan 2.60, untuk mengkompensasi efek dari *stray capacitance*, maka nilai R_1 dan R_2 pada rangkaian pengali kapasitansi (gambar 2.10) diatur untuk mendapatkan nilai $C_{efektif} = C_{OS}$ dari nilai kapasitansi referensi C_R , sehingga :

$$V_O = G \cdot \left(\frac{V_S \cdot Z_1}{Z} \right) \cdot \left(\frac{-(Z_1' + Z_2' + Z_1' \cdot Z_2' \cdot J\omega C_{efektif}) + (Z_1 + Z_2 + Z_1 \cdot Z_2 \cdot J\omega C_{efektif} + Z_1 \cdot Z_2 \cdot J\omega C_X)}{(Z_1' + Z_2' + Z_1' \cdot Z_2' \cdot J\omega C_{efektif})} \right) \quad (2.61)$$

$$V_O = G \cdot \left(\frac{V_S \cdot Z_1}{Z} \right) \cdot \left(\frac{(Z_1 \cdot Z_2 \cdot J\omega C_X)}{(Z_1' + Z_2' + Z_1' \cdot Z_2' \cdot J\omega C_{efektif})} \right) \quad (2.62)$$

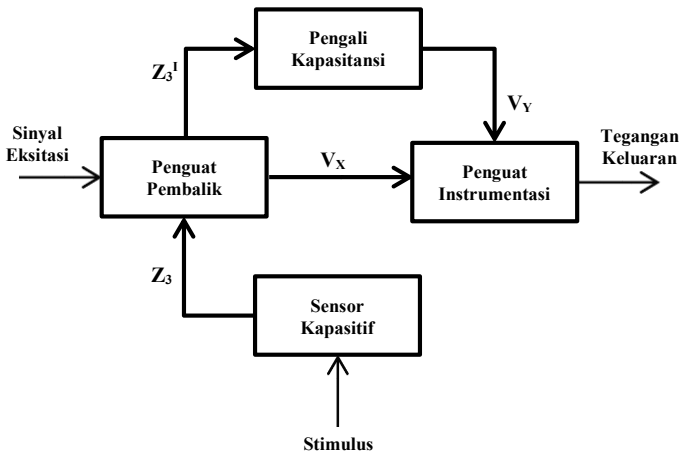
$Z_1 = Z_1'$; $Z_2 = Z_2'$ sehingga didapatkan persamaan akhir :

$$V_O = G \cdot \left(\left(\frac{V_S \cdot Z_1}{Z} \right) \frac{(Z_P \cdot J\omega C_X)}{(1 + Z_P \cdot J\omega C_{efektif})} \right) \quad (2.63)$$

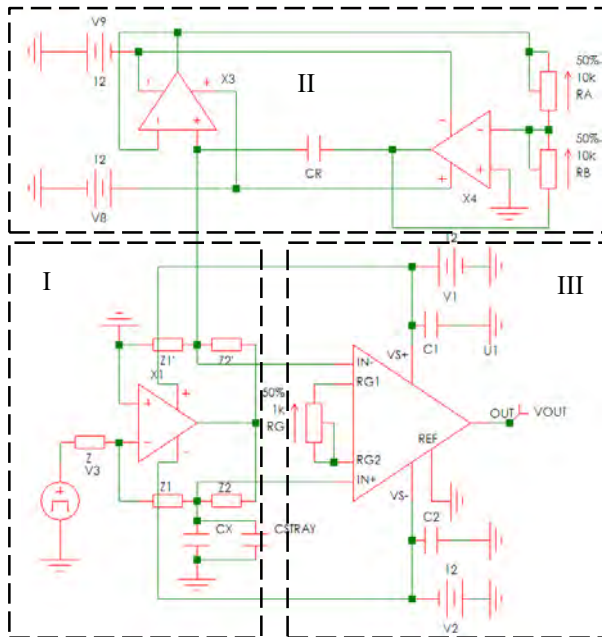
Dimana $Z_P = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$; C_x = kapasitansi sensor dan $C_{efektif}$ = kapasitansi efektif dari pengali kapasitansi.

Cara kerja rangkaian Analog Front End yang diimplementasikan berdasarkan penelitian pada[4] (gambar 2.16) adalah sebagai berikut:

Sinyal eksitasi sinusoidal digunakan untuk mendapatkan respon frekuensi dari sensor kapasitif yaitu reaktansi kapasitif. Sinyal eksitasi konstan ini merupakan sinyal masukan dari rangkaian penguat pembalik. Pada rangkaian penguat pembalik sensor kapasitif ditempatkan pada bagian umpan balik negatif dari rangkaian. Sensor ditempatkan pada komponen impedansi *T-network* yang terhubung ke *ground*(Z_3).



Gambar 2.15 Diagram blok cara kerja rangkaian *analog front end*[4]



Gambar 2.16 Skematik rangkaian *analog front end* berdasarkan[4]

Hal ini dimaksudkan untuk mengondisikan sensor kapasitif yang salah satu kaki(*lead*)nya harus terhubung ke *ground*(*grounded sensor*). Beberapa jenis sensor membutuhkan koneksi *grounded* ke rangkaian pengondisinya untuk mendapatkan hasil pembacaan yang konsisten dan reproduibilitas yang baik.

Perubahan impedansi dari sensor akibat parameter yang di-indra akan mengubah nilai impedansi umpan balik rangkaian penguat pembalik, sesuai dengan persamaan 2.19 dan mengubah penguatan rangkaian, serta tegangan keluaran penguat pembalik, sehingga dengan sumber tegangan eksitasi yang konstan akan didapatkan perubahan tegangan keluaran yang proporsional terhadap nilai kapasitansi dari sensor, pada kondisi ideal dimana tidak terdapat *stray capacitance* pada sensor. Karena terdapat *stray capacitance* pada sensor, dibutuhkan rangkaian kompensator pada keluaran penguat pembalik yang berupa *T network* dengan pengali kapasitansi pada bagian impedansi Z_3^1 (gambar 2.12).

Fungsi dari rangkaian pengali kapasitansi ini adalah untuk mendapatkan impedansi efektif dari Z_3^1 agar nilainya sesuai atau mendekati nilai dari impedansi akibat *stray capacitance* pada sensor, tanpa harus menggunakan kapasitor variabel, dan hanya menggunakan kapasitor dengan nilai yang relatif kecil (C_R). Tegangan pada rangkaian kompensator, V_Y dinyatakan dengan persamaan 2.47 kemudian disubtraksi dengan tegangan V_X (persamaan 2.12) dengan menggunakan penguat instrumentasi untuk menghilangkan pengaruh dari *stray capacitance* sensor.

Dari persamaan 2.62 terlihat bahwa komponen C_{OS} yang mengganggu C_X terkompensasi oleh $C_{efektif}$ sehingga tidak terdapat komponen C_{OS} pada persamaan keluaran *analog front end*. Sebagai gantinya terdapat komponen $C_{efektif}$ pada persamaan 2.62. Komponen $C_{efektif}$ ini tidak mempengaruhi atau mengubah nilai C_X karena berdasarkan persamaan 2.62 keluaran *analog front end* tetap berubah secara linier terhadap C_X . Komponen $C_{efektif}$ ini hanya berpengaruh terhadap sensitivitas dan dapat dikompensasi dengan mengubah gain dari penguat Instrumentasi.

Dari analisa rangkaian *analog front end* ini didapatkan kesimpulan bahwa rangkaian ini dapat mengkompensasi adanya kapasitansi parasitik atau *stray capacitance* pada sensor dengan mengatur nilai dari kapasitansi efektif rangkaian pengali kapasitansi agar sama dengan atau mendekati nilai dari *stray capacitance* pada sensor dengan mengubah nilai R_1 dan R_2 pada rangkaian pengali kapasitansi, dengan nilai C_R tertentu yang diketahui. Dengan nilai $C_{efektif} = C_{OS}$ maka C_{OS} dan $C_{efektif}$ pada bagian penguat differensial di rangkaian penguat instrumentasi dapat saling menghilangkan dan didapatkan keluaran yang tidak memiliki komponen C_{OS} .

2.1.3 Sistem Akuisisi Data

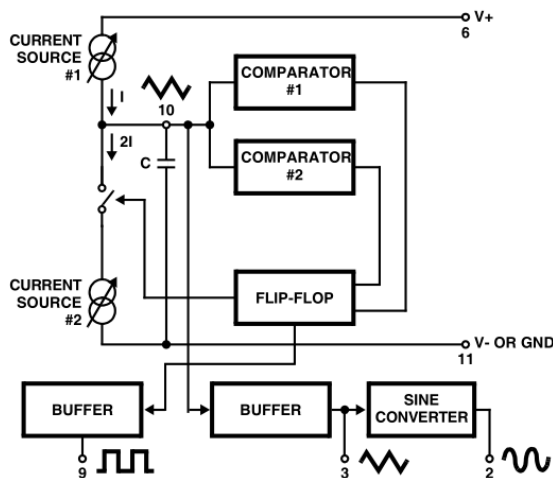
Akuisisi data adalah proses pengambilan sampel dari sebuah sinyal yang mengukur kondisi fisik dunia nyata dan mengkonversi sampel yang dihasilkan menjadi nilai numerik digital sehingga dapat diproses oleh komputer. Sistem akuisisi data pada tugas akhir ini meliputi bagian - bagian berikut :

2.1.3.1 Generator Sinyal

Penggunaan sinyal eksitasi untuk mengeksitasi sebuah sensor bergantung pada karakteristik turunan yang diukur dari sensor tersebut. Untuk mengukur impedansi yang perubahannya proposional terhadap perubahan kapasitansi sensor digunakan sinyal eksitasi AC. Sinyal AC digunakan karena impedansi merupakan respon frekuensi dari sensor kapasitif. Untuk menghasilkan sinyal AC digunakan rangkaian generator sinyal.

Rangkaian generator sinyal AC terbagi menjadi dua kategori : generator sinyal sinusoidal, dan generator sinyal nonsinusoidal sedangkan generator sinyal nonsinusoidal sendiri meliputi generator pulsa, dan osilator relaksasi(*relaxation oscillator*). Generator sinyal yang digunakan pada tugas akhir ini adalah generator sinyal sinusoidal yang menggunakan IC ICL8038.

IC ICL8038 merupakan IC generator sinyal produksi Intersil yang dapat menghasilkan sinyal sinusoidal, kotak, segitiga, sawtooth, dan pulsa yang presisi dan tidak membutuhkan banyak komponen eksternal. Frekuensi sinyal keluaran dapat disesuaikan secara eksternal mulai dari 0.001 Hz sampai lebih dari 300 kHz menggunakan kapasitor atau resistor, dan dapat melakukan modulasi frekuensi dan *sweeping* dengan tegangan suplai eksternal[8].



Gambar 2.17 Blok diagram internal IC ICL8038[12]

Cara kerja IC ICL8038 adalah sebagai berikut : pada blok diagram gambar 2.17, sebuah kapasitor eksternal C di-charge dan discharge oleh dua sumber arus(sumber arus #1 dan sumber arus #2 pada gambar 2.17). Sumber arus #2 di-saklar nyala dan mati oleh sebuah *flip-flop*, sedangkan sumber arus #1 menyala secara kontinyu. Ketika *flip-flop* men-saklar sumber arus #2 mati, kapasitor C di-charge dengan arus I, sehingga tegangan pada kapasitor naik secara linier terhadap waktu.

Ketika tegangan pada kapasitor C mencapai ambang batas atas dari komparator(di set 2/3 dari tegangan suplai), *flip – flop* terpicu dan berganti *state*, sehingga menyalakan sumber arus #2. Sumber arus #2 menghasilkan arus 2I, sehingga kapasitor C di-discharge dengan arus total $+I - 2I = -I$ (arah arus *discharge*) dan tegangan pada kapasitor C turun secara linier terhadap waktu. Ketika tegangan tersebut mencapai ambang batas bawah dari komparator(di set 1/3 dari tegangan suplai), *flip-flop* kembali terpicu ke *state* awalnya, dan siklus kerja diulang kembali.

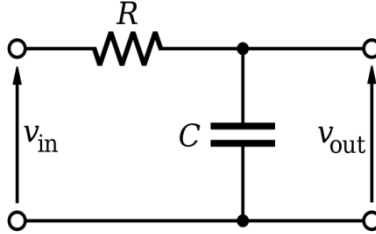
Karena kapasitor di-charge dan discharge dengan arus yang sama, dan durasi *charge - discharge* yang sama, dihasilkan sinyal segitiga pada terminal kapasitor C. Sinyal ini kemudian di *buffer* untuk mendapatkan amplitudo sinyal yang lebih besar, sebelum menuju rangkaian konverter sinus. Sinyal sinusoidal hasil konversi ini dapat di-*trim* dengan menggunakan dua buah resistor variabel untuk mendapatkan sinyal sinusoidal dengan distorsi hingga kurang dari 1%.

2.1.3.2 Filter Low Pass

Rangkaian resistor kapasitor, atau RC filter, adalah rangkaian elektronik yang terdiri atas resistor dan kapasitor yang menggunakan daya dari suatu sumber tegangan atau sumber arus. Rangkaian filter RC orde satu terdiri dari satu resistor dan satu kapasitor merupakan contoh sederhana dari rangkaian filter RC. Rangkaian filter RC merubah hubungan antara sinyal dengan frekuensi rendah maupun tinggi pada bagian masukan maupun keluaran untuk melewatkan sinyal yang diinginkan[13].

Frekuensi *cut off*(f_c) dari filter *low pass* dengan RC dapat dituliskan dalam persamaan matematik sebagai berikut :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.64)$$



Gambar 2.18 Rangkaian filter *low pass* pasif orde 1[13]

Tegangan keluaran filter pasif *low pass* dari rangkaian pada gambar 2.18 dapat dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut :

$$V_{out} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R} \times V_{in} \quad (2.65)$$

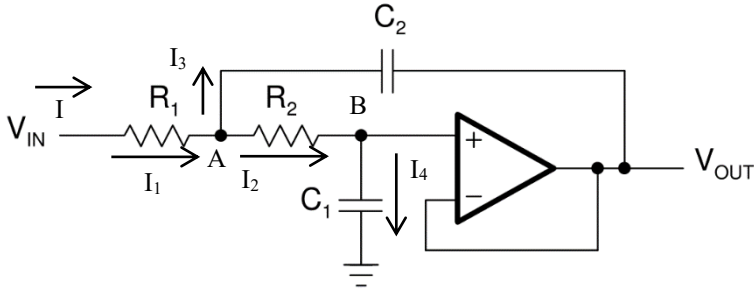
Besarnya penguatan tegangan (G) pada filter pasif yang ideal maksimum adalah 1 = 0dB yang hanya terjadi pada frekuensi sinyal masukan dibawah frekuensi *cut off* (f_c).

$$G = \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| \quad (2.66)$$

Penguatan tegangan (G) filter *low pass* dapat dituliskan dalam satuan dB sebagai berikut :

$$G = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}} = 20 \log \frac{1}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \quad (2.67)$$

Untuk mendapatkan atenuasi sinyal yang lebih besar, rangkaian filter RC pasif pada gambar 2.18 dapat dapat *dicascade* dan diubah menjadi filter RC/*low pass* aktif dengan penambahan sebuah penguat operasional. Rangkaian filter RC pasif orde satu memiliki atenuasi sinyal sebesar -20dB/dekade, sedangkan rangkaian filter aktif pada gambar 2.19 memiliki atenuasi sebesar -40/dekade.



Gambar 2.19 Rangkaian filter *low pass* - 40dB/dec

Pada gambar 2.19 tegangan V_{out} diumpankan balik pada titik masukan negatif, pada titik A melalui C_2 . Selisih tegangan antara kedua masukan penguat operasional adalah nol, sehingga tegangan V_{out} juga sama dengan tegangan pada input pembalik dan input tak pembalik penguat operasional. Berdasarkan hukum kirchoff I pada titik A dan B :

$$\text{Titik A : } I_1 = I_2 + I_3$$

$$\text{Titik B : } I_2 = I_4$$

Tegangan V_{out} sama dengan tegangan pada titik B (V_B), sehingga :

$$I_4 = \frac{V_B}{\frac{1}{j\omega C_1}} = j\omega \cdot C_1 \cdot V_B = j\omega \cdot C_1 \cdot V_{out} \quad (2.68)$$

$$I_2 = \frac{V_A - V_B}{R_2} = \frac{V_A - V_{OUT}}{R_2} \quad (2.69)$$

$$I_2 = I_4 = j\omega \cdot C_1 \cdot V_{out} \quad (2.70)$$

$$\frac{V_A - V_{OUT}}{R_2} = j\omega \cdot C_1 \cdot V_{out} \quad (2.71)$$

$$V_A = V_{out} + j\omega \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot V_{out} \quad (2.72)$$

$$I_3 = \frac{V_A - V_{OUT}}{\frac{1}{j\omega C_2}} = (V_A - V_{OUT}) \cdot j\omega \cdot C_2 \quad (2.73)$$

Dari substitusi persamaan 2.72 ke persamaan 2.73 didapatkan persamaan:

$$I_3 = ((V_{out} + j\omega \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot V_{out}) - V_{out}) \cdot j\omega \cdot C_2 \quad (2.74)$$

$$I_3 = -\omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot V_{out} \quad (2.75)$$

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (2.76)$$

Persamaan 2.70 dan 2.75 disubstitusi ke persamaan 2.76 sehingga :

$$\frac{V_{IN}-V_A}{R_1} = j\omega \cdot C_1 \cdot V_{out} + (-\omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot V_{out}) \quad (2.77)$$

$$V_{IN} = (V_A + (j\omega \cdot C_1 \cdot R_1 \cdot V_{out})) + (-\omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot V_{out}) \quad (2.78)$$

Substitusi persamaan 2.72 ke persamaan 2.78 dihasilkan :

$$V_{IN} = V_{out} + j\omega \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot V_{out} + j\omega \cdot C_1 \cdot R_1 \cdot V_{out} + (-\omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot V_{out}) \quad (2.79)$$

$$V_{IN} = V_{out}\{1 - \omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 + j\omega \cdot C_1 \cdot (R_1 + R_2)\} \quad (2.80)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{IN}} = \frac{1}{1 - \omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 + j\omega \cdot C_1 \cdot (R_1 + R_2)} \quad (2.81)$$

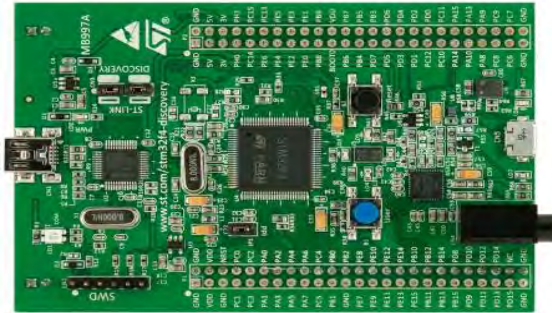
Pada filter *low pass*, $\omega = \omega_c$ maka nilai penguatan:

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{IN}} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707 \quad (2.82)$$

Dan sudut padanya sama dengan -90° . Supaya menghasilkan sudut $+90^\circ$ Maka nilai $1 - \omega_c^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2$ harus sama dengan nol, atau

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2.83)$$

2.1.3.3 Mikrokontroler STM32

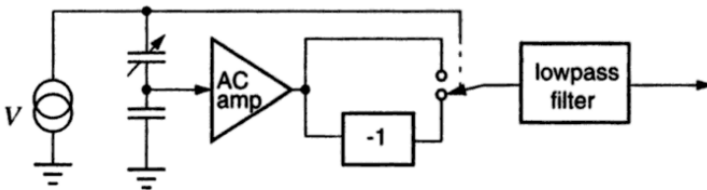


Gambar 2.20 Tampilan fisik *board* mikrokontroler STM32F4[14]

Mikrokontroler *STM32F4 discovery* adalah mikrokontroler berbasis arsitektur ARM (Advanced Risc Machine) sebuah prosesor 32 bit yang lebih handal dalam hal transfer data dan hemat daya. *Chip* STM32F407V6GT6 mempunyai banyak fitur yang dapat digunakan, seperti *I/O*, *Timer*, *ADC*, dan *DMA*. Kecepatan *clock*-nya bisa mencapai 168Mhz sehingga memungkinkan untuk mengerjakan perintah program yang cukup panjang dalam waktu yang cukup singkat[14].

Fungsi dari mikrokontroler STM32 ini untuk mengkonversi data analog menjadi digital dengan memanfaatkan *ADC* internal yang memiliki resolusi maksimal 12 bit, mengirimkan data hasil konversi secara *serial* dan implementasi *kontroller* untuk sistem. STM32F4 memiliki 3 *ADC* didalamnya yaitu *ADC1*, *ADC2*, dan *ADC3*. Setiap *ADC* memiliki resolusi maksimal 12 bit dan bisa diatur 10 bit, 8 bit atau 6 bit. Ada 16 pin (*channel*) yang tersedia untuk masukan sinyal analog dan tambahan tiga masukan untuk pengukuran suhu chip (*Vtemp*), tegangan referensi (*Vref*) dan tegangan baterai (*Vbat*). *ADC3* hanya terhubung dengan 8 *channel* sedangkan *ADC1* dan *ADC 2* terhubung 16 *channel* dan untuk *Vtemp*, *Vref*, serta *Vbat* hanya terhubung ke *ADC1* sebagai master. *ADC* yang digunakan adalah *ADC channel 1* pada pin *A0*. Proses pemrograman STM32F4 menggunakan *software keil μvision5*.

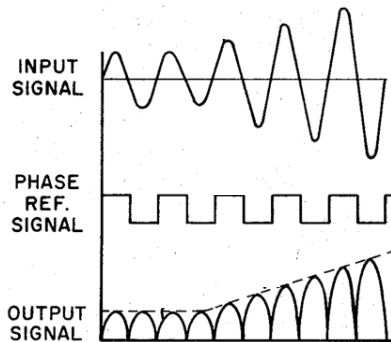
2.1.3.4 Demodulator sinkron



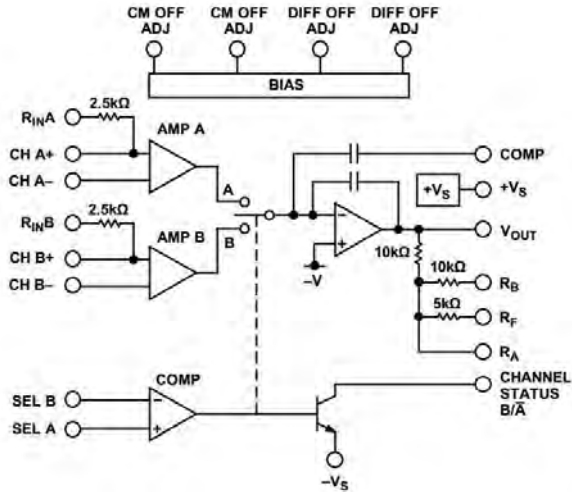
Gambar 2.21 Ilustrasi prinsip kerja sebuah rangkaian demodulator sinkron[1]

Demodulator sinkron merupakan rangkaian elektronika yang berfungsi untuk melakukan konversi sinyal AC menjadi sinyal DC dengan amplitudo yang proporsional terhadap sinyal input.

Pada gambar 2.21 sebuah saklar analog yang dikendalikan oleh sinyal referensi digunakan untuk men-switch sebuah penguat operasional secara bergantian dari penguat tak pembalik ke penguat pembalik selama setengah siklus dari sinyal masukan, sehingga sinyal keluaran dari demodulator sinkron adalah sinyal hasil penyearahan gelombang penuh. Bentuk sinyal keluaran untuk setiap setengah siklus merupakan replika dari sinyal masukan, dengan polaritas yang dibalik, sesuai dengan hubungan fase antara sinyal referensi dan sinyal masukan.



Gambar 2.22 Hubungan antar sinyal masukan dan sinyal referensi terhadap sinyal keluaran[1]

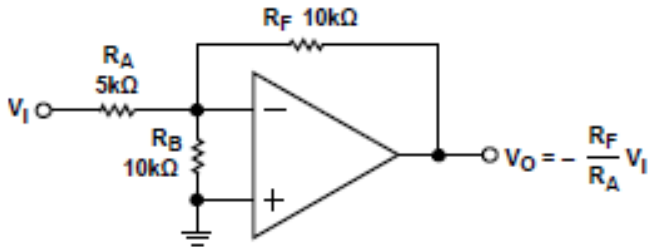


Gambar 2.23 Skematik internal IC AD630[15]

IC balance modulator/demodulator AD630 produksi Analog Devices dapat dikonfigurasi menjadi demodulator sinkron dengan prinsip kerja seperti pada gambar 2.21. IC AD630 mengkombinasikan arsitektur komutasi yang fleksibel dengan akurasi dan kestabilan temperatur dari resistor *laser trimmed thin film*. Resistor internal pada IC AD630 memberikan penguatan loop tertutup ± 1 dan $2 \pm$ dengan akurasi hingga 0.05%[11].

Secara sederhana, prinsip kerja IC AD630 dapat dilihat sebagai 2 tingkat penguatan terpisah yang dapat dihubungkan ke jalur sinyal melalui kontrol dari sebuah komparator. Komparator memilih satu dari 2 masukan untuk melengkapi *loop* umpan balik pada IC AD630.

Ketika masukan B aktif, resistor R_A dan R_F terhubung dan membentuk umpan balik pembalik sehingga AD630 berkerja sebagai sebuah penguat pembalik dengan penguatan 1. Resistor R_B diantara terminal pembalik dan tak pembalik tidak mempengaruhi penguatan keluaran karena AD630 memiliki penguatan tertutup yang cukup untuk meminimalisir efek pembebanan R_B pada virtual *ground* di masukan pembalik.

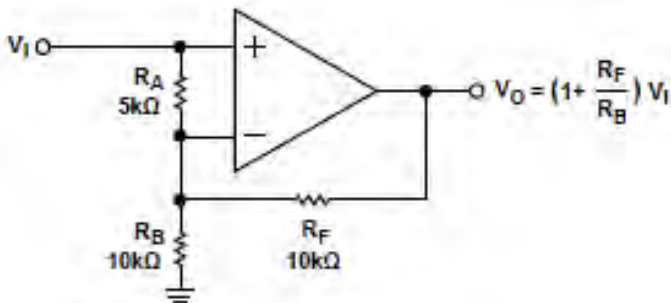


Gambar 2.24 Konfigurasi penguat pembalik pada IC AD630[15]

Ketika polaritas masukan komparator(sinyal referensi dari masukan atau sinyal eksitasi sensor) berubah, masukan B di non-aktifkan dan masukan A dipilih. Rangkaian ekuivalen pada konfigurasi penguatan tak pembalik adalah seperti gambar 2.25. Pada konfigurasi penguat tak pembalik, R_A terhubung diantara terminal pembalik dan tak pembalik. Karena penguat operasional *men-drive* perbedaan tegangan yang disebabkan oleh R_A menjadi nol, penguatan *loop* tertutup dari penguat tidak terpengaruh. Besar penguatan kedua tingkat penguatan akan sama ketika :

$$\frac{R_F}{R_A} = 1 + \frac{R_F}{R_B} \quad (2.84)$$

Yang dapat diatur dengan memilih nilai $R_A = R_F R_B / (R_F + R_B)$, yang merupakan resistansi ekuivalen paralel dari R_F dan R_B .



Gambar 2.25 Konfigurasi tak pembalik penguat operasional pada IC AD630[15]

2.1.4 Komunikasi Serial

Terdapat dua cara komunikasi *serial* yaitu komunikasi data secara asinkron dan komunikasi data secara sinkron. Pada komunikasi data *serial* sinkron, sinyal *clock* dikirim bersama dengan data *serial*, sedangkan pada komunikasi data *serial* asinkron, sinyal *clock* tidak dikirimkan bersama-sama data *serial*, tetapi dibangkitkan secara independen baik pada sisi pengirim maupun pada sisi penerima. Parameter-parameter yang digunakan untuk komunikasi *serial* adalah sebagai berikut:

1. Kecepatan pengiriman satu karakter per detik (*baudrate*)
2. Jumlah bit per karakter (*data length*)
3. *Parity* yang digunakan untuk menjaga integritas dari data
4. *Stop* dan *Start Bit*

Dalam Mikrokontroler STM32, perangkat USART memiliki empat pemancar dan penerima *universal synchronous/ asynchronous* (USART1, USART2, dan USART6), serta dua pemancar dan penerima *universal asynchronous* (UART4, UART5, UART7, dan UART8). Keenam antarmuka yang disediakan adalah komunikasi asinkron, dukungan *IrDA SIR endec*, modus komunikasi multiprosesor, modus komunikasi *half-duplex* satu-kabel dan memiliki kemampuan *LIN master/slave*. [13].

2.1.4.1 Konverter Serial TTL ke Serial RS232

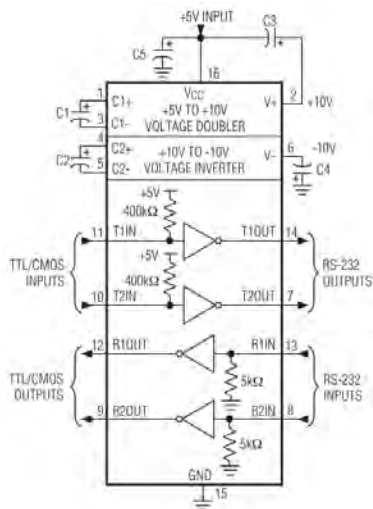
Komunikasi *serial* antara mikrokontroler menggunakan protokol komunikasi USART atau UART dengan level tegangan logika TTL, dimana logika 1 dinyatakan dengan level tegangan 5-2 Volt dan logika 0 dinyatakan dengan level tegangan 0-1 Volt. Komunikasi dengan level logika TTL hanya bisa digunakan untuk jarak dekat, dalam jarak 1 meter. Untuk jarak yang lebih jauh, kapasitansi kabel transmisi menyebabkan distorsi pada sinyal TTL sehingga terjadi kesalahan pada pengiriman dan pembacaan sinyal. Kabel yang lebih panjang juga membuat sinyal rentan terinterferensi oleh derau.

Untuk mentransmisikan data dalam jarak yang lebih jauh dapat digunakan standar komunikasi EIA/TIA-232-E atau lebih dikenal dengan RS232. RS232 menggunakan level logika bipolar dimana logika 1 dinyatakan dengan level tegangan 5 Volt(minimum) dan logika 0

dinyatakan dengan level tegangan -5 Volt(minimum). Protokol RS232 dapat mentransmisikan data dengan jarak yang lebih jauh(hanya dibatasi oleh kapasitansi kabel maksimal 2500pF), sehingga kabel bisa dibuat sepanjang mungkin dengan menggunakan kabel yang kapasitansinya minimum.

Untuk mengirimkan data *serial* UART dari mikrokontroller menggunakan standar komunikasi RS232 dibutuhkan konversi tegangan logika dari TTL ke level tegangan logika RS232. IC MAX232CPE merupakan IC konverter level tegangan TTL ke 232 produksi Maxim Integrated.

IC MAX232 memiliki dua rangkaian *charge-pump* internal yang menghasilkan tegangan $\pm 10\text{V}$ dari tegangan suplai +5V untuk operasi *driver* RS232. Konverter pertama menggunakan kapasitor C_1 untuk mengandakan tegangan(*Voltage Doubler*) masukan +5V menjadi +10V pada kapasitor C_3 di pin V^+ . Konverter kedua menggunakan kapasitor C_2 untuk mengubah polaritas tegangan dari +10V menjadi -10V pada kapasitor C_4 di pin V^- . Tegangan keluaran tipikal *driver* RS232 adalah $\pm 8\text{V}$ dengan tegangan minimal $\pm 5\text{ Volt}$. *Slew rate* keluaran dibatasi $< 30\text{V}/\mu\text{s}$ dengan *slew rate* tipikal $24\text{V}/\mu\text{s}$ dan $10\text{V}/\mu\text{s}$ ketika dibebani dengan impedansi 3Ω , 2500pF.



Gambar 2.26 Internal IC MAX232CPE[16]

2.1.4.2 Konverter Serial RS232 to USB



Gambar 2.27 Tampilan perangkat BF-810 *USB to Serial Adapter*[17]

Komputer atau laptop memiliki standar komunikasi *Universal Serial Bus*(USB) untuk komunikasi antara perangkat masukan-keluaran dengan komputer. Untuk menghubungkan perangkat dengan standar komunikasi RS232 ke komputer dibutuhkan konverter dari standar komunikasi RS232 ke USB. BF-810 *USB to Serial Adapter* merupakan modul konverter RS232 ke USB produksi BAFO Technologies. Perangkat ini mendukung komunikasi bidireksional USB 1.1 dengan kecepatan transfer data maksimum 12 Mbps, dan tidak membutuhkan suplai tegangan eksternal[17].

2.1.5 Kelembaban

Kelembaban udara secara umum menyatakan banyaknya uap air yang terdapat di udara. Kelembaban udara biasanya dinyatakan dalam satuan persen. Kelembaban udara dibagi menjadi kelembaban mutlak dan kelembaban relatif. Kelembaban mutlak menyatakan banyaknya uap air maksimum dalam gram untuk tiap 1 m³ udara pada suhu tertentu. Kelembaban mutlak merupakan batas terjadinya kondensasi pada suhu tertentu. Apabila kondensasi terjadi maka ada perubahan fase dari uap air menjadi air. Kondensasi ini biasanya terjadi pada pembentukan air hujan di awan. Kelembaban mutlak bernilai sama dengan kelembaban relatif 100% yang berlaku untuk tiap-tiap suhu udara. Kemudian nilai kelembaban mutlak untuk tiap suhu udara selalu berbeda dan tidak ada yang sama. Berikut adalah tabel nilai kelembaban mutlak untuk suhu tertentu.

Tabel 2.1 Nilai kelembaban mutlak pada suhu udara tertentu[18]

SUHU UDARA (°C)	KELEMBABAN MUTLAK (g/m ³)
0	4,85
5	6,8
10	9,4
11	10,01
12	10,66
13	11,35
14	12,07
15	12,83
20	17,3
25	23
30	30,4
40	51,1
60	130,5
80	293,8
95	505
96	523
97	541
98	560
99	579
100	598

Berdasarkan tabel 2.1, semakin naik suhu udara maka semakin besar jumlah uap air maksimum yang dapat berada di udara. Jadi semakin tinggi suhu udara nilai kelembaban mutlak juga semakin besar. Kelembaban mutlak untuk tiap suhu perlu diketahui sebab apabila jumlah uap air tetap sedangkan suhu berubah maka kelembaban relatif berubah.

Kelembaban relatif adalah banyaknya uap air dalam gram untuk tiap 1 m³ udara pada suhu tertentu. Jadi jumlah uap air untuk kelembaban relatif selalu lebih kecil dari kelembaban mutlak. Secara matematis kelembaban relatif dapat dihitung dengan membagi jumlah uap air di udara dengan nilai kelembaban mutlak pada suhu tertentu kemudian dikalikan 100%. Oleh sebab itu satuan nilai kelembaban relatif dinyatakan dalam persen. Pada umumnya kelembaban relatif udara biasa disebut kelembaban udara saja[18].

$$R_H = \frac{e}{E} \times 100\% \quad (2.85)$$

R_H : Kelembaban Relatif

e : Kelembaban mutlak

E : Kelembaban mutlak pada suhu tertentu

2.1.5.1 Larutan Garam Tersaturasi

Larutan garam tersaturasi dapat digunakan untuk menghasilkan nilai kelembaban relatif yang diketahui, terutama untuk pengujian dan kalibrasi dari higrometer atau alat ukur kelembaban udara. Larutan garam tersaturasi merupakan campuran cair dari air yang terdestilasi(aquadest) dan garam murni dalam wadah tertutup yang terbuat dari logam atau kaca. Ketika kondisi ekuilibrium tercapai, dihasilkan kelembaban relatif yang konstan pada ruangan didalam wadah. Beberapa larutan garam tersaturasi menghasilkan kelembaban relatif yang relatif independen terhadap temperatur[19].

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan larutan garam tersaturasi untuk menghasilkan kelembaban relatif yang konstan antara lain : Wadah penampung harus tertutup rapat, dan terbuat dari bahan yang tidak berpori, seperti kaca, plastik atau logam. Wadah, larutan dan udara disekitar wadah harus berada dalam kondisi ekuilibrium. Larutan garam tersaturasi dapat menghasilkan kelembaban relatif yang konstan dengan akurasi 2-5% terhadap nilai teoritisnya.

Tabel 2.2 Kelembaban relatif beberapa larutan garam tersaturasi[19]

Suhu	Kelembaban relatif(%)					
	LiCl·H ₂ O	MgCl ₂ ·6H ₂ O	NaCl	(NH ₄) ₂ SO ₄	KNO ₃	K ₂ SO ₄
0°	14,7	35,0	74,9	83,7	97,6	99,1
5°	14,0	34,6	75,1	82,6	96,6	98,4
10°	13,3	34,2	75,2	81,7	95,5	97,9
15°	12,8	33,9	75,3	81,1	94,4	97,5
20°	12,4	33,6	75,5	80,6	93,2	97,2
25°	12,0	33,2	75,8	80,3	92,0	96,9
30°	11,8	32,8	75,6	80,0	90,7	96,6
35°	11,7	32,5	75,5	79,8	89,3	96,4
40°	11,6	32,1	75,4	79,6	87,9	96,2
45°	11,5	31,8	75,1	79,3	86,5	96,0
50°	11,4	31,4	74,7	79,1	85,0	95,8

2.1.6 Plant Growth Chamber

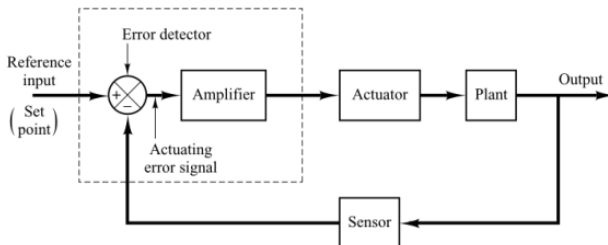
Salah satu contoh aplikasi yang membutuhkan pengaturan kelembaban dengan *setting point* yang stabil adalah *plant growth chamber*. Sebuah *plant growth chamber* merupakan ruangan dengan lingkungan terkendali, yang krusial untuk mendapatkan hasil pengamatan yang dapat direproduksi dalam penelitian eksperimen biologi tanaman[20]. *Plant growth chamber* memungkinkan peneliti untuk menentukan pengaruh dari parameter biotik atau abiotik tertentu pada tanaman. Berbagai jenis tanaman dapat dikembangkan biakkan di dalam lingkungan buatan dimana semua faktor abiotiknya dapat dikendalikan. Dengan mengubah satu faktor atau lebih (misalnya : temperatur, kelembaban) maka pengaruhnya terhadap tanaman dapat diteliti.

Eksperimen dilapangan sangat berguna untuk studi ekologi tetapi dipengaruhi oleh banyak faktor secara simultan. Hal ini menyebabkan sulitnya melakukan inferensi dari respon tanaman terhadap satu faktor lingkungan tertentu. *Plant growth chamber* memungkinkan peneliti untuk menentukan kondisi lingkungan apa yang respon tertentu pada tanaman. Beberapa faktor lingkungan yang dapat dikendalikan pada sebuah *plant growth chamber* antara lain: intensitas cahaya, kelembaban, temperatur, aliran udara, kadar CO₂ udara.



Gambar 2.28 Tampilan fisik sebuah *plant growth chamber*[20]

2.1.7 Kontroller



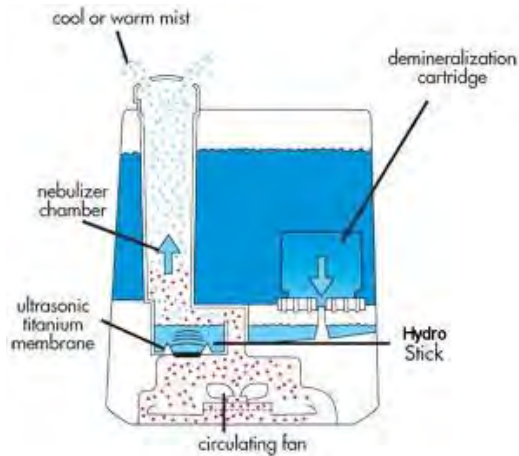
Gambar 2.29 Blok diagram sebuah sistem kontrol *loop* tertutup[21]

Kontroler merupakan salah satu komponen sistem yang berfungsi mengolah sinyal umpan balik dan sinyal referensi menjadi sinyal kontrol sedemikian rupa sehingga performansi dari sistem yang dikendalikannya sesuai dengan spesifikasi performansi yang di inginkan. Dalam sebuah sistem kontrol *loop* tertutup, kontroller menghasilkan variabel kontrol atau sinyal kontrol yang didapatkan dari masukan berupa nilai galat, yang merupakan selisih antara *set point* atau nilai referensi dari sistem kontrol terhadap *actual value* atau nilai sebenarnya, yaitu nilai hasil pengukuran. Hasil pengukuran sensor pada suatu sistem kontrol sangat berpengaruh pada hasil pengaturan dari sistem kontrol. Hasil pengukuran yang tidak stabil atau terdapat galat yang besar mengakibatkan kontroller mendapatkan nilai *actual value* yang salah, sehingga dihasilkan nilai galat yang terlalu besar atau terlalu kecil, dan nilai yang diinginkan atau nilai referensi dari sistem kontrol tidak tercapai.

2.1.8 Aktuator

2.1.8.1 *Humidifier Ultrasonik*

Humidifier merupakan sebuah divais, atau alat yang digunakan untuk meningkatkan kelembaban di dalam suatu ruangan tertutup. *Humidifier* ultrasonik menggunakan sebuah transduser *piezoelektrik* untuk menghasilkan getaran mekanis dengan frekuensi ultrasonik dalam sebuah wadah berisi air. Getaran ini kemudian menghasilkan uap air berukuran sangat kecil, yang dengan cepat menguap ketika dikeluarkan dari alat dengan menggunakan sebuah kipas kecil yang menciptakan aliran udara keluar.



Gambar 2.30 Ilustrasi cara kerja sebuah humidifier ultrasonik[22]

2.1.8.2 Kipas Ventilasi



Gambar 2.31 Tampilan fisik sebuah kipas ventilasi[23]

Kipas ventilasi atau juga bisa disebut *exhaust fan* merupakan sebuah kipas dengan penggerak motor elektrik yang digunakan untuk mengatur

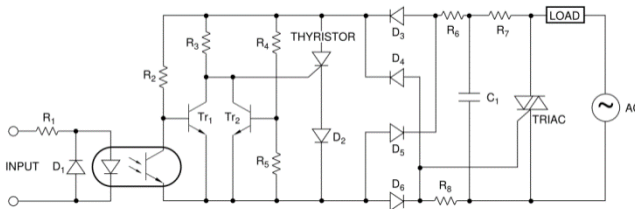
lingkungan di dalam suatu ruang dengan cara membuat udara, gas, bau, partikel di udara(debu, uap air) dari dalam ruang tersebut keluar melalui aliran udara yang dihasilkan ketika bilah kipas berputar. Ketika udara di dalam ruang dikeluarkan maka partikel di udara(uap air) juga ikut berkurang sehingga kelembaban udara menjadi turun.

2.1.8.3 Solid State Relay

SSR(Solid State Relay) adalah sebuah perangkat semikonduktor yang dapat digunakan sebagai pengganti *relay* elektromekanik untuk menghubungkan arus listrik ke beban dalam berbagai aplikasi, salah satunya sebagai *driver* dari aktuator. *Solid state relay* memiliki artian bahwa relay ini tidak memiliki bagian yang bergerak. Dalam sebuah perangkat SSR, tidak ada perangkat yang akan menjadi aus karena pergerakan kontak/gesekan dan SSR mampu menghidupkan dan mematikan kontak jauh lebih cepat daripada kontaktor relay mekanik.

Sebuah SSR berisi satu atau lebih masukan yang terdiri dari sebuah LED(*light Emitting Diode*) sebagai *driver*. masukan ini menyediakan hubungan secara optik ke sebuah *phototransistor* atau *photodiode*, yang kemudian menghubungkan sinyal dari masukan secara optik ke perangkat *switching*. Perangkat *switching* biasanya berupa MOS-FET(*Metal Oxide Field Effect Transistor*) atau TRIAC(*Triode for Alternating Current*).

Gambar 2.32 merupakan merupakan rangkaian internal dari sebuah *Opto-Coupler SSR*, dimana sinyal kontrol diterapkan pada sebuah sumber cahaya (LED atau LED inframerah) dan ditransmisikan secara optik ke bagian pendeteksi optik, yang dapat berupa *photodiode*, *phototransistor* atau *photothyristor*.Keluaran dari perangkat foto sensitif ini kemudian digunakan untuk memicu perangkat *switching* keluaran berupa TRIAC, MOSFET atau SCR(*Silicon Controlled Rectifier*) yang terhubung ke beban untuk mengaktifkan atau menonaktifkan arus beban.



Gambar 2.32 Rangkaian internal sebuah *Opto-Coupler SSR*[24]

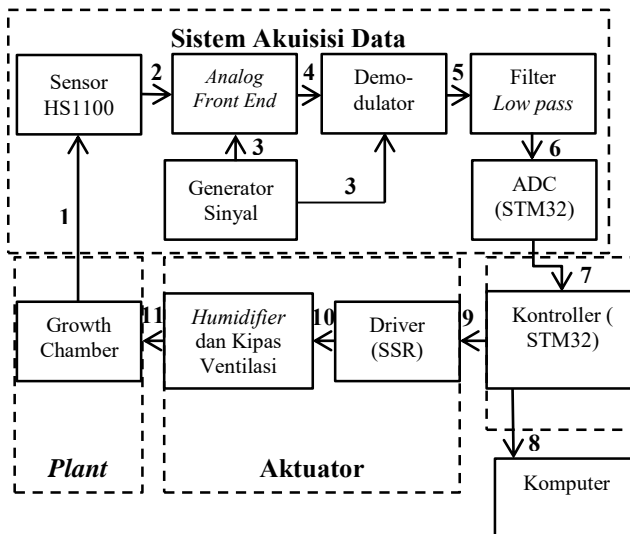
BAB III PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini akan dijelaskan secara rinci terkait perancangan sistem secara keseluruhan. Hasil perancangan ini kemudian akan diimplementasikan untuk membentuk suatu sistem kontrol kelembaban yang mengimplementasikan *analog front end* pada sensor kapasitif yang digunakan. Bab ini menjelaskan tentang diagram blok sistem secara keseluruhan dan perancangan dari tiap blok yang ada.

3.1 Diagram Blok Sistem

Berikut ini merupakan cara kerja keseluruhan sistem :

Nilai referensi diatur secara program dimikrokontroller STM32, kemudian mikrokontroller melakukan akuisisi data kelembaban relatif dari *plant* melalui sensor dan sistem akuisisi data. Data ini diolah untuk dijadikan hasil pengukuran kelembaban relatif, yang nilainya dikirim kembali ke komputer melalui komunikasi *serial* untuk ditampilkan, serta dibandingkan dengan nilai referensi untuk menghasilkan nilai galat.



Gambar 3.1 Diagram blok alur kerja dari sistem

Nilai galat ini diproses oleh kontroller yang di implementasikan di mikrokontroller STM32. Sinyal kontrol yang sesuai kemudian dikirimkan ke aktuator untuk menghasilkan aksi kontrol pada *plant*. Masing – masing sinyal pada blok diagram pada Gambar 3.1 memiliki keterangan sebagai berikut :

Keterangan :

1. Kelembaban relatif di dalam *plant*
2. Perubahan kapasitansi dari sensor kapasitif HS1100
3. Sinyal eksitasi AC sinusoidal
4. Sinyal analog keluaran *Analog Front End*
5. Sinyal analog keluaran demodulator sinkron
6. Sinyal DC keluaran dari filter *low pass*
7. Sinyal digital hasil pembacaan ADC mikrokontroller STM32
8. Hasil pengukuran kelembaban relatif dari mikrokontroller STM32 melalui komunikasi *serial*
9. Sinyal kontrol dari kontroller
10. Sinyal *drive* untuk aktuator

Aksi kontrol dari aktuator (humidifier ultrasonik meningkatkan kelembaban, kipas ventilasi mengurangi kelembaban).

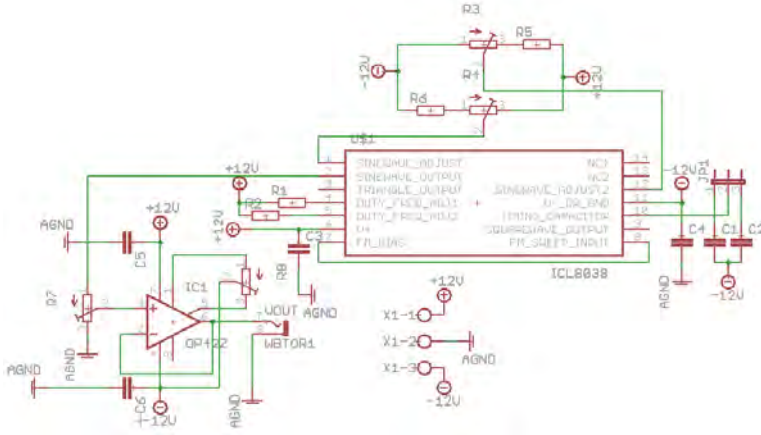
3.2 Sistem Akuisisi Data

Perangkat keras yang dirancang pada sistem akuisisi data meliputi : rangkaian generator sinyal, rangkaian filter *low pass*, rangkaian demodulator sinkron, rangkaian konverter serial ke RS232. Perangkat lunak yang dirancang yaitu program pembacaan ADC mikrokontroller STM32, dan program akuisisi data dikomputer.

3.2.1 Rangkaian Generator Sinyal

Rangkaian generator sinyal digunakan untuk menghasilkan sinyal eksitasi AC untuk sensor kapasitif. Untuk rangkaian generator sinyal pada tugas akhir ini digunakan IC ICL8038 produksi Intersil. Kriteria perancangan untuk generator sinyal yaitu :

- Sinyal keluaran sinusoidal
- Frekuensi sinyal keluaran 10KHz
- Amplitudo sinyal keluaran 1Vpp
- *Duty Cycle* sinyal 50%
- Rangkaian beroperasi dengan tegangan supply $\pm 12V$



Gambar 3.2 Skematik rangkaian generator sinyal

Frekuensi sinyal keluaran diatur menggunakan dua resistor pewaktuan terpisah R_1 dan R_2 , untuk mendapatkan *duty cycle* sebesar 50% yang mengikuti persamaan :

$$t_1 = \frac{C \times V}{I} = \frac{C \times \frac{1}{3} \times V_{SUPPLY} \times R_1}{0.22 \times V_{SUPPLY}} = \frac{R_1 \times C}{0.66} \quad (3.1)$$

T_1 merupakan persamaan pewaktuan untuk bagian negatif dari sinyal sedangkan T_2 merupakan persamaan pewaktuan untuk bagian positif dari sinyal.

$$t_2 = \frac{C \times V}{I} = \frac{C \times \frac{1}{3} \times V_{SUPPLY}}{2(0.22) \frac{V_{SUPPLY}}{R_2} - 0.22 \frac{V_{SUPPLY}}{R_2}} = \frac{R_1 \times R_2 \times C}{0.66(2R_1 - R_2)} \quad (3.2)$$

Dari persamaan diatas, untuk mendapatkan *duty cycle* sebesar 50%, dipilih nilai $R_1 = R_2$. Dengan menggunakan dua resistor pewaktuan terpisah, frekuensi sinyal keluaran dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{\frac{R_1 C}{0.66} \left(1 + \frac{R_2}{2R_1 - R_2} \right)} \quad (3.3)$$

Atau jika $R_1 = R_2 = R$

$$f = \frac{0.33}{RC} \quad (3.4)$$

Dimana C adalah kapasitor pewaktu eksternal. Dalam pemilihan nilai R_1 , R_2 dan C, perlu diperhatikan batasan besar arus *charging* pada IC untuk performa yang optimum. Arus *charging* kurang dari $1\mu A$ dapat menyebabkan galat yang signifikan pada kondisi temperatur tinggi akibat dari arus bocor. Untuk arus *charging* yang besar ($I > 5mA$), beta dari transistor dan tegangan saturasi transistor dapat menyebabkan galat yang signifikan. Performa optimum didapatkan ketika arus *charging* berada pada rentang $10\mu A$ sampai $1mA$. Besar arus *charging* dapat dihitung dari persamaan berikut :

$$I = \frac{R_1 \times (V_+ - V_-)}{(R_1 + R_2)} \times \frac{1}{R_1} = \frac{0.22(V_+ - V_-)}{R_1} \quad (3.5)$$

Dari persamaan diatas, dipilih $R_1 = R_2 = 33K\Omega$ dengan arus $I = 160\mu A$. Untuk mendapatkan frekuensi sinyal keluaran $10KHz$ maka :

$$C1 = \frac{10KHz}{0.33 \times 33K\Omega} \quad (3.6)$$

Didapatkan nilai C1 sebesar $100nF$. Untuk mendapatkan distorsi sinyal sinusoidal yang kurang dari 1% ditambahkan resistor variabel R_3 , R_4 dan resistor R_5 , R_6 secara seri diantara pin 11 dan 12. Resistor variabel ini digunakan untuk mengatur bentuk sinyal keluaran sinusoidal untuk mendapatkan sinyal dengan distorsi paling minimum. Berdasarkan *datasheet* IC ICL8038, dipilih resistor variabel R_3 , $R_4 = 100K\Omega$, dan resistor R_5 , $R_6 = 10K\Omega$.

Amplitudo sinyal keluaran rangkaian generator sinyal memiliki persamaan $V_{SINE} = 0.22 \times V_{SUPPLY}$. Dengan tegangan suplai $\pm 12VDC$ maka amplitudo sinyal keluaran = $5.28 \text{ Volt(Peak to Peak)}$. Untuk mencapai kriteria rancangan yaitu amplitudo sinyal keluaran = $1 V_{pp}$ sinyal keluaran rangkaian generator sinyal dimasukkan ke rangkaian pembagi tegangan yang direalisasikan dengan variabel resistor R_7 , yang kemudian di-*buffer* dengan menggunakan penguat operasional yang dikonfigurasi sebagai *unity gain buffer*. Untuk pembagi tegangan, dipilih variabel resistor sebesar $1K\Omega$.

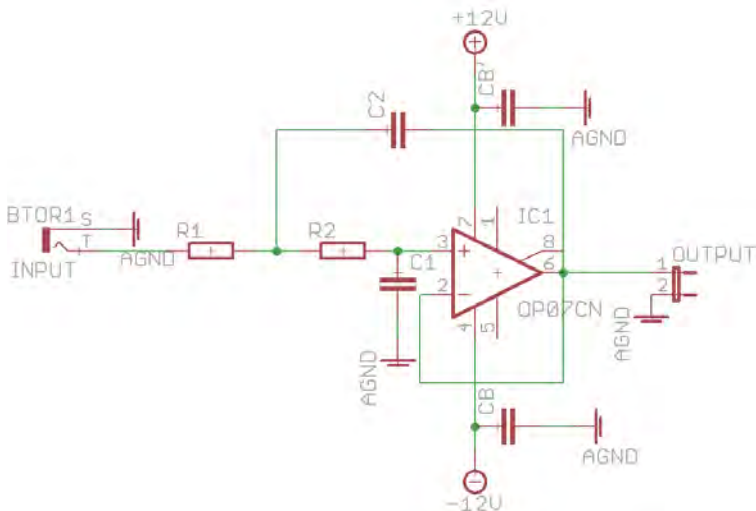
IC penguat operasional yang digunakan harus memiliki kriteria *unity gain stable* dan memiliki *slew rate* $\geq 2 \times \pi \times 10KHz \times 1V = 0,06 V/\mu s$. Untuk memenuhi kriteria tersebut dipilih IC penguat operasional

OP42 produksi Analog Devices, yang memiliki kriteria *unity gain stable* dan *slew rate* sebesar 50 V/ μ s.

3.2.2 Rangkaian Filter Low Pass

Filter low pass pada sistem akuisisi data ini berfungsi untuk merata – rata(*averaging*) keluaran rangkaian demodulator sinkron yang berupa sinyal hasil penyearahan gelombang penuh menjadi sinyal DC dan mereduksi frekuensi sinyal eksitasi 10KHz dari sensor. Dalam rancangan ini dipilih filter *low pass* -40dB dengan frekuensi *cut-off* sebesar 2.5 Hz. Frekuensi *cut-off* ini dipilih untuk mendapatkan respon DC dari keluaran demodulator sinkron. Gambar rangkaian dari filter *low pass* - 40dB/dec adalah seperti gambar 3.3

Berdasarkan persamaan 2.83 untuk mendapatkan frekuensi *cut-off* sebesar 2.5 Hz, dipilih R_1 dan R_2 sebesar 82K Ω dan 150K Ω . Nilai ini dipilih berdasarkan pertimbangan agar nilai kapasitor yang digunakan tidak terlalu besar. Dengan nilai resistor R_1 dan R_2 sebesar 82K Ω dan 150K Ω , nilai C_1 dan C_2 dipilih 470nF dan 680nF.



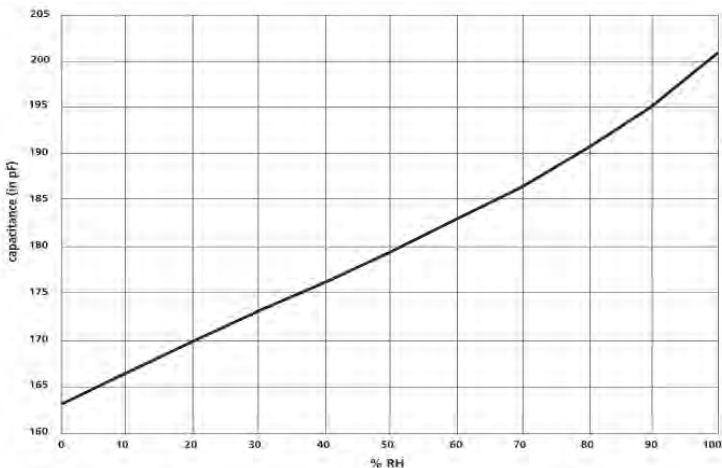
Gambar 3.3 Skematik rangkaian filter *low pass* -40dB/dekade 2.5Hz

Parameter yang mempengaruhi pemilihan IC penguat operasional yang digunakan adalah performa dc yang baik serta, rendah derau, karena keluaran filter ini adalah sinyal dc yang merupakan masukan dari ADC STM32, dimana derau pada input ADC dapat berpengaruh pada kesalahan pembacaan ADC.

Untuk memenuhi kriteria tersebut dipilih IC penguat operasional OP07 produksi Analog Devices yang memiliki fitur rendah derau, serta memiliki tegangan *offset* DC yang rendah.

3.2.3 Sensor Kapasitif HS1101

Pada tugas akhir ini, digunakan sensor kapasitif HS1100. Sensor HS1100 merupakan sensor kelembaban relatif berbasis kapasitif yang diproduksi oleh Humirel. Sensor ini memiliki keluaran analog yaitu perubahan kapasitansi, dengan karakteristik keluaran yang linier hingga 70% RH. Perubahan kapasitansi sensor terhadap kelembaban relatif pada sensor ini relatif kecil, sehingga rentan terhadap *stray capacitance* oleh karena itu membutuhkan rangkaian pengondisi yang dapat mengkompensasi *stray capacitance*. Sensor ini memiliki karakteristik sebagai berikut :



Gambar 3.4 Kurva perubahan kapasitansi sensor kapasitif HS1100 terhadap kelembaban relatif [8]

Tabel 3.1 Karakteristik sensor kapasitif HS1100[8]

Parameter	
Rentang kelembaban(RH)	1% – 99%
Temperatur <i>ambient</i>	-40°C – 100°C
Kapasitansi nominal(25°)	180 pF pada 55% RH
Sensitivitas rata - rata	0.34 pF/% RH
Koefisien temperatur	0.04 pF/°C
Waktu respon(33% RH – 76% RH)	5 detik
Histerisis kelembaban	±1.5%
Kestabilan jangka panjang	0.5% RH/tahun
Tegangan suplai	5V, 7V maksimal
Arus bocor	1 nA
Deviasi dari kurva respon tipikal(10% – 90%)	±2%

Terlihat dari kurva karakteristik perubahan kapasitansi sensor, bahwa perubahan kapasitansi sensor pada kondisi RH > 70% tidak linier. Kurva karakteristik ini dapat didekati dengan persamaan polinomial yang didapatkan dari *datasheet* sensor[8] :

$$RH(\%) = -3,4656 \cdot 10^3 \cdot X^3 + 1,0732 \cdot 10^4 \cdot X^2 - 1,0457 \cdot 10^4 \cdot X + 3,2459 \cdot 10^3 \quad (3.7)$$

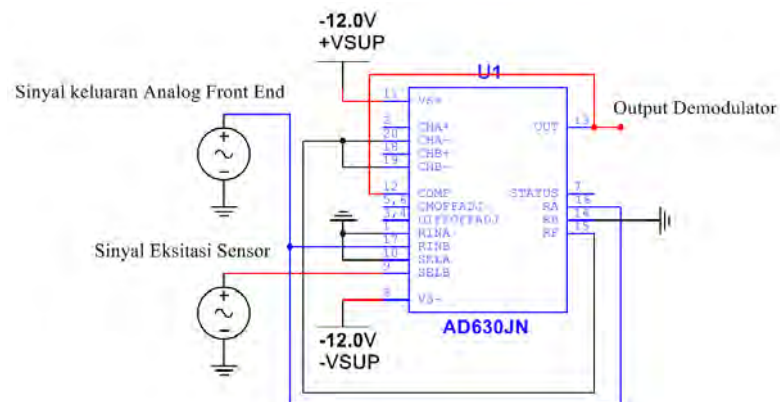
Dengan $X = C(\text{terukur})/C$ pada 55%RH(tipikal 180pF). Untuk mengonversi hasil pembacaan sensor maka persamaan 3.12 digunakan untuk menghasilkan pembacaan dalam RH. *Datasheet* sensor HS1101 merekomendasikan penggunaan sensor secara terpolariasi, dimana salah satu kaki dari sensor dihubungkan ke *ground* untuk mendapatkan reproduibilitas hasil pengukuran yang lebih baik[8]. Kondisi ini membutuhkan rangkaian pengondisi sinyal yang sesuai untuk *grounded* sensor.



Gambar 3.5 Tampilan fisik sensor kapasitif HS1100[8]

3.2.4 Rangkaian Demodulator Sinkron

Pada sistem akuisisi data yang dirancang digunakan rangkaian demodulator sinkron yang menggunakan IC AD630 produksi Analog Devices. IC AD630 merupakan IC *balanced modulator/demodulator* yang dapat dikonfigurasi sebagai demodulator sinkron. Berikut skematik rangkaian demodulator sinkron :



Gambar 3.6 Skematik rangkaian demodulator sinkron menggunakan IC AD630

Sinyal keluaran *analog front end* dihubungkan ke pin RINB dan RA, sedangkan sinyal eksitasi sensor dihubungkan ke pin SELB. Input komparator B(SELB) dihubungkan ke referensi *ground*, sehingga ketika sinyal eksitasi sensor polaritasnya positif, komparator internal IC mengaktifkan masukan A dan AD630 berfungsi sebagai penguat tak pembalik dengan penguatan 1, dan saat sinyal eksitasi sensor polaritasnya negatif, komparator mengaktifkan masukan B dan AD630 berfungsi sebagai penguat pembalik dengan gain 1. Pin 12 dari IC AD630 merupakan pin keluaran dan dihubungkan ke pin 12(COMP) untuk menghubungkan kapasitor kompensasi frekuensi internal dalam IC. Alasan penggunaan kapasitor kompensasi frekuensi ini adalah untuk mengoptimalkan *bandwidth* dari IC AD630.

3.2.5 Program Pembacaan ADC STM32

Mikrokontroler STM32 secara umum digunakan untuk mengkonversikan data analog menjadi data digital dengan memanfaatkan ADC internal mikrokontroler STM32. Dalam tugas akhir ini digunakan ADC dengan resolusi 12 bit, sehingga perhitungan ADC (Analog Digital Converter) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$ADC = \frac{V_{in} \times 4095}{V_{ref}} \quad (3.8)$$

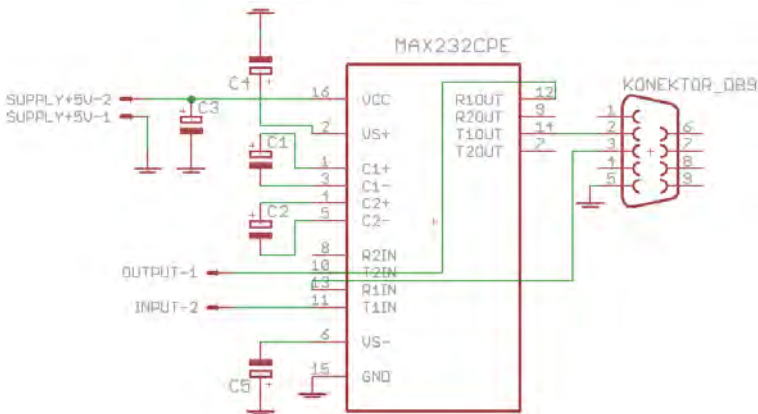
Dan dalam aplikasi program pembacaan data sensor adalah sebagai berikut:

```
adc = TM_ADC_Read(ADC1, ADC_Channel_0);
```

Dari program diatas pin yang digunakan adalah PA0 dengan input maksimal sebesar 3 volt(V_{ref}). Untuk mengonversi pembacaan ADC dari bit menjadi milivolt, dilakukan konversi dengan mengalikan nilai ADC dengan nilai tegangan 1 LSB($\frac{V_{ref}}{4095}$) yaitu 0,7326 mV, sehingga didapatkan hasil pembacaan dalam milivolt.

```
milivolt = ADC*0.7326;
```

3.2.6 Rangkaian Konverter Serial ke RS232



Gambar 3.7 Skematik rangkaian konverter *serial* ke RS232

Untuk mengkonversi level tegangan TTL ke level tegangan RS232 digunakan IC MAX232CPE produksi Maxim Integrated. IC MAX232 membutuhkan 5 kapasitor eksternal yang dibutuhkan rangkaian *charge pump* internal IC untuk menghasilkan tegangan +10Volt dari tegangan suplai, dan membalik polaritas untuk menghasilkan tegangan -10Volt.

Untuk kapasitor eksternal digunakan kapasitor tantalum dengan nilai kapasitansi 1µF, tegangan kerja 16 volt. IC MAX232 membutuhkan tegangan suplai +5Volt. *Transmitter* data *serial* dengan level tegangan TTL dihubungkan ke pin T1IN dan *receiver* dihubungkan ke pin R1OUT. Keluaran data *serial* RS232 dihubungkan ke konektor DB9 melalui pin T1OUT sedangkan masukan data *serial* RS232 dihubungkan melalui pin R1IN.

3.2.7 Konverter RS232 ke USB

Komunikasi antara mikrokontroller dengan komputer membutuhkan perubahan standar komunikasi ke USB, untuk itu diperlukan perangkat yang mengonversi dari standard komunikasi *serial* ke USB. Pada tugas akhir ini digunakan konverter *serial* RS232 ke USB BF-810 produksi BAFO Technologies. Konverter BF-810 memiliki tipe konektor DB9 sehingga bisa langsung dihubungkan ke keluaran konverter *serial* ke RS232.



Gambar 3.8 Tampilan fisik BF-810 konverter RS232 ke USB

3.2.8 Komputer

Pada tugas akhir ini digunakan sebuah komputer sebagai perangkat antar muka akuisisi data dan penampil data *serial* dari mikrokontroller kedalam bentuk grafik. Spesifikasi komputer yang digunakan pada tugas akhir ini adalah:

- Merk : Toshiba
- Model : Sattelite L-510
- CPU : Intel ® Core (TM)2Duo T6600 @2.20GHz
- RAM : 4GB
- Tipe Sistem : 64-bit

3.2.9 Program Komunikasi Serial STM32

Salah satu peran mikrokontroller STM32 dalam sistem akuisi data adalah mengirimkan data hasil konversi ADC ke komputer melalui komunikasi *serial*. Pengaturan komunikasi *serial* yang digunakan adalah:

- *Baud rate* : 9600 bps
- Jumlah data tiap pengiriman : 8 bit
- *Stop Bit* : 1 bit
- *Parity Bit* : tidak ada
- *Flow control* : tidak ada

Untuk menggunakan peripheral USART untuk komunikasi *serial* pada mikrokontroller STM32, terlebih dahulu dilakukan inisialisasi perangkat USART yang digunakan. Dalam Mikrokontroller STM32, perangkat USART memiliki empat pemancar dan penerima universal

sinkron/asinkron (USART1, USART2, dan USART6) dan dua pemancar penerima universal asinkron (UART4, UART5, UART7, dan UART8). Untuk mengirimkan data *serial* secara sinkron digunakan peripheral USART1. Berikut program inisialisasi USART1 dengan konfigurasi baud rate 9600 bps :

```
TM_USART_Init(USART1, TM_USART_PinsPack_2, 9600);
```

Dari program diatas, digunakan USART1 dengan USART_PinsPack_2 dimana port yang digunakan adalah port B6 sebagai pengirim dan port B7 sebagai penerima data *serial*. Data hasil konversi ADC memiliki tipe data *integer*, sedangkan untuk melakukan pengiriman data melalui *serial* dibutuhkan tipe data *char* atau *string*, oleh karena itu terlebih dahulu dilakukan konversi data ke *string* :

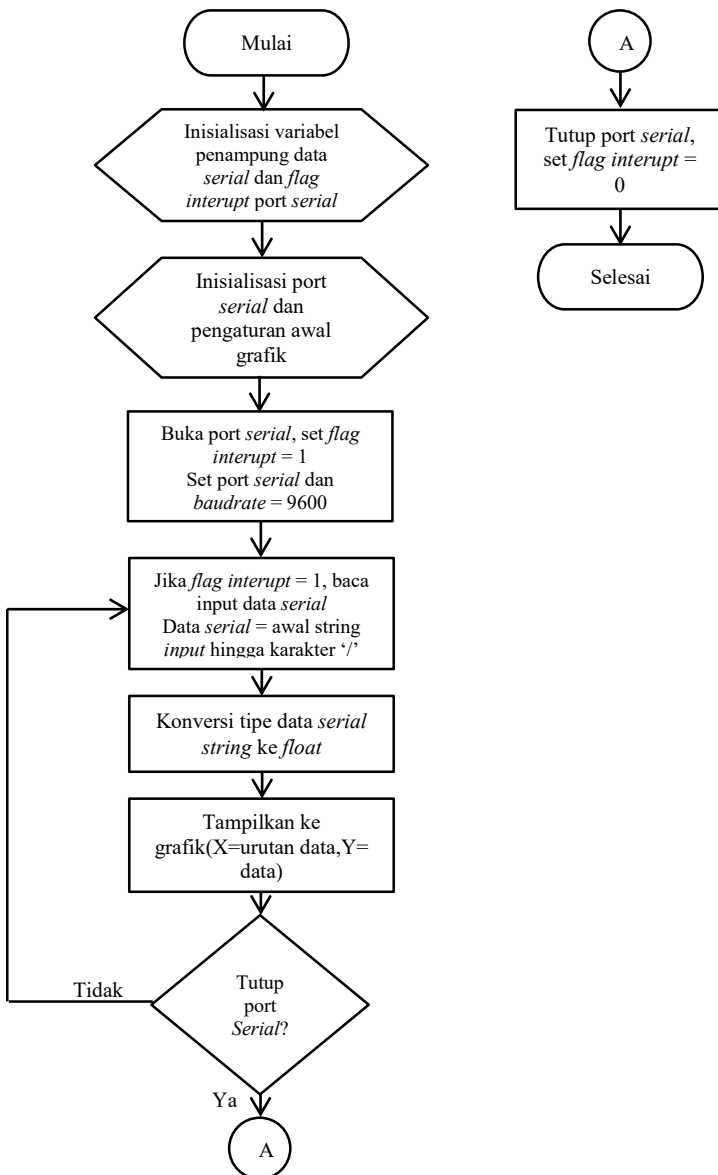
```
sprintf(str, "%2.1f\n", hasil1);
```

Variabel hasil1 menyimpan data hasil konversi ADC. Data hasil konversi ini kemudian dirubah ke tipe data string dengan format %2.1f yang artinya data memiliki 2 karakter didepan koma dan satu karakter dibelakang koma(00.0). Data diberikan penanda berupa karakter '/' untuk memudahkan proses pembacaan data pada komputer. Hasil konversi ke *string* kemudian disimpan dalam variabel str untuk selanjutnya dikirimkan melalui peripheral USART :

```
TM_USART_Puts(USART1, str);
```

3.2.10 Program Akuisisi Data

Untuk menampilkan data *serial* dari mikrokontroller dalam tampilan grafik dirancang sebuah antarmuka menggunakan perangkat lunak *Microsoft Visual Basic*. *Microsoft Visual Basic* merupakan bahasa pemrograman berorientasi objek dan lingkungan pengembangan terintegrasi(IDE) dengan bahasa pemrograman yang diturunkan dari bahasa pemrograman *Basic*. Berikut ini adalah diagram alir program untuk menampilkan data *serial* ke dalam bentuk grafik.



Gambar 3.9 Diagram alir program menampilkkan data *serial* ke grafik

Pada gambar 3.9 program diawali dengan inisialisasi variabel penampung data *serial* dan *flag* untuk *interrupt serial*. *Flag* merupakan penanda yang digunakan untuk indikator bahwa port *serial* telah diaktifkan atau dibuka. Pengguna kemudian melakukan pengaturan port *serial* yang digunakan sebagai input serta pengaturan *baudrate*. Ketika port *serial* telah dibuka, maka *flag interrupt* diset menjadi “1” dan proses pembacaan data *serial* dimulai. Data *serial* masukan berupa *string* yang merupakan susunan yang berurutan atau *array* dari data bertipe *char*/karakter. Karakter ‘/’ digunakan untuk memisahkan antara data pertama dengan data selanjutnya. Ketika program membaca karakter ‘/’ maka data dari awal *string* hingga sebelum karakter ‘/’ terbaca sebagai satu data dan disimpan dalam variabel penampung data *serial*.

Data *serial* pada variabel penampung kemudian dikonversi menjadi tipe data *float*. Konversi ini perlu dilakukan karena data bertipe *karakter* atau *string* tidak dapat ditampilkan ke grafik. Data *serial* hasil konversi kemudian ditampilkan ke grafik dengan sumbu X berupa urutan data dan sumbu Y berupa data hasil konversi ke *float*. Proses terus berlangsung hingga pengguna perintah untuk menutup port *serial*. Ketika perintah tutup port *serial* terdeteksi maka program menon-aktifkan port *serial* dan men set *flag interrupt serial* = 0.

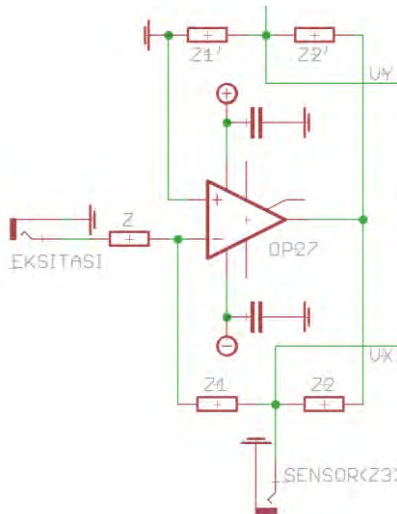
3.3 Analog Front End

Pada tugas akhir ini diimplementasikan sebuah *analog front end* berdasarkan hasil penelitian pada[4], untuk mengompensasi *stray capacitance* pada sensor. Rangkaian *analog front end* ini terdiri dari beberapa bagian, yaitu penguat pembalik, pengali kapasitansi dan penguat instrumentasi.

3.3.1 Rangkaian Penguat Pembalik

Pada bagian *T network* penguat pembalik, Z_1 dan Z_2 serta nilai Z_1^1 dan Z_2^1 pada bagian kompensator diimplementasikan menggunakan resistor, dengan nilai $R_1 = Z_1 = Z_1^1$ sebesar $1M\Omega$ dan $R_2 = Z_2 = Z_2^1$ sebesar 180Ω . Nilai ini dipilih untuk mendapatkan kondisi dimana $[1 \gg 1 + R_p \cdot j\omega C_R]$ pada bagian denominator dari persamaan keluaran *analog front end* (2.59):

$$V_O = G \cdot \left(\left(\frac{V_S \cdot Z_1}{Z} \right) \frac{(R_p \cdot j\omega C_X)}{(1 + R_p \cdot j\omega C_R)} \right) \quad (3.9)$$



Gambar 3.10 Skematik rangkaian penguat pembalik pada *analog front end*

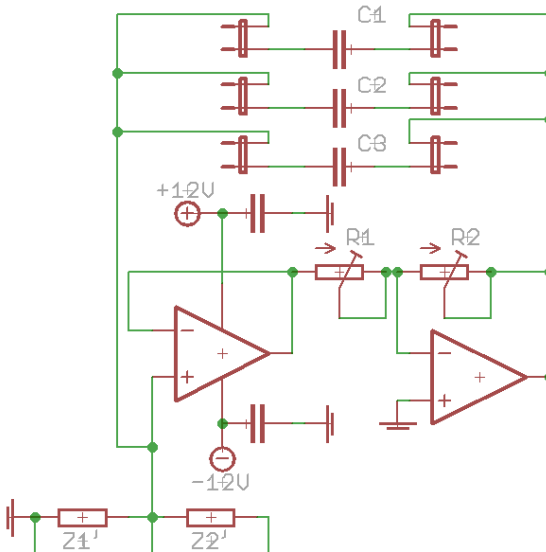
Dimana $Z_p = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$; sehingga pengaruh *stray capacitance* pada keluaran dapat dikompensasi selama nilai $C_R = C_s(\text{stray capacitance})$. Nilai Z dipilih sebesar 100 K Ω untuk menghindari penguatan sinyal input yang terlalu besar pada node V_X berdasarkan persamaan 2.15: $V_X = -\frac{V_S}{Z} \cdot Z_1$. Dengan nilai $Z_1 = 1\text{M}\Omega$ dan $Z = 100\text{K}\Omega$ dan V_S 1Vpp maka tegangan pada node $V_X = 10\text{Vpp}$.

Penguat operasional yang digunakan pada bagian penguat pembalik adalah IC OP27 produksi Analog Devices. OP27 dipilih karena memiliki karakteristik DC yang baik yaitu tegangan offset rendah(30 μV), untuk menghindari tegangan offset DC pada sinyal keluaran. Sinyal masukan penguat pembalik memiliki frekuensi 10kHz, dengan amplitudo 1Vpp. Tegangan keluaran maksimum pada node V_X memiliki amplitudo 10 Vpp sehingga penguat operasional yang digunakan harus memiliki *slew rate* $\geq 2 \times \pi \times 10\text{KHz} \times 10\text{V} = 0,62\text{V}/\mu\text{s}$ agar tidak terjadi distorsi pada tegangan keluaran. IC OP27 memiliki *slew rate* sebesar (2.8V/ μs) sehingga sesuai dengan kriteria desain. Nilai penguatan tegangan pada penguat pembalik ini ditentukan oleh nilai Z_1 , Z_2 dan Z_3 dimana Z_3 merupakan impedansi dari sensor kapasitif berdasarkan persamaan 2.22:

$$V_O = - \left(\frac{\frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 + Z_2}{Z_3}}{Z} \right) \cdot V_S \quad (3.10)$$

Untuk nilai $Z_1 = 1\text{M}\Omega$ dan $Z_2 = 180\Omega$ dan $Z = 100\text{K}\Omega$ maka tegangan $V_O = \left(\frac{1.8 \times 10^8 \Omega}{Z_3} + 10,0018 \right) \cdot 1\text{Vpp}$. Tegangan keluaran maksimum dari penguat operasional yang digunakan dengan *slew rate* = $2.8\mu\text{V/s}$ adalah $2 \times \pi \times 10\text{KHz} \times V_{\text{max}} = 2800000$, $V_{\text{max}} = 44,56\text{ V}$. Karena tegangan suplai dari rangkaian adalah $+12\text{V}$ dan -12V (24 volt rail ke rail) maka tegangan maksimum keluaran dari penguat adalah $\pm 22\text{Volt}$. Dari desain disimpulkan bahwa salah satu keterbatasan rangkaian penguat pembalik dengan *T network* ini adalah ketika nilai impedansi $Z_3 < 15\text{ M}\Omega$, atau ketika sensor tidak dihubungkan, dapat terjadi saturasi pada keluaran penguat pembalik. Untuk menghindari kerusakan pada IC penguat operasional maka rangkaian harus dinyalakan setelah sensor terhubung.

3.3.2 Rangkaian Pengali Kapasitansi



Gambar 3.11 Skematik rangkaian pengali kapasitansi

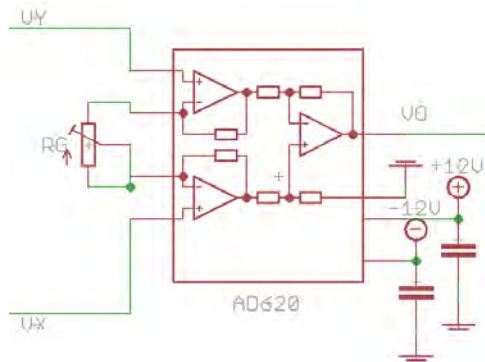
Penguat operasional pada bagian *Pengali kapasitansi* direalisasikan dengan menggunakan IC OP2277, yang merupakan IC *Precision Dual Opamp*. IC ini digunakan pada bagian pengali kapasitansi karena memiliki tegangan offset yang rendah serta stabil dalam konfigurasi *Unity Gain*. Pada rangkaian pengali kapasitansi, digunakan kapasitor referensi C_R dengan 3 nilai yang berbeda (C_1 , C_2 , C_3) untuk mengakomodasi rentang kapasitansi *stray* yang dikompensasi. Kapasitor referensi ini nilainya diukur menggunakan LCR Meter BK Precision 8898. Pada tugas akhir ini digunakan kapasitor dengan nilai terukur 149,7pF(C_1), 99,5pF(C_2) dan 220pF(C_3). Resistor R_1 dan R_2 diimplementasikan menggunakan resistor multiturn dengan nilai 1K Ω .

3.3.3 Rangkaian Penguat Instrumentasi

Pada bagian penguat instrumentasi, digunakan IC AD620 yang merupakan IC penguat instrumentasi produksi Analog Devices. IC AD620 dibuat berdasarkan pendekatan rangkaian 3 *op-amp* sebagai penguat instrumentasi, IC ini mempunyai tingkat akurasi tinggi dan hanya memerlukan 1 resistor eksternal R_G untuk mengatur penguatan dengan rentang 1 hingga 10000 kali. Berikut ini adalah skematik rangkaian penguat Instrumentasi :

Resistor internal R_1 dan R_2 (persamaan 2.46) pada AD620 nilainya tetap, sebesar 24,7k Ω , sehingga penguatan dapat dihitung berdasarkan nilai tahanan eksternal R_G dengan persamaan (2.53).

$$G = \frac{49,4k\Omega}{R_G} + 1 \quad (3.10)$$



Gambar 3.12 Rangkaian penguat instrumentasi dengan IC AD620

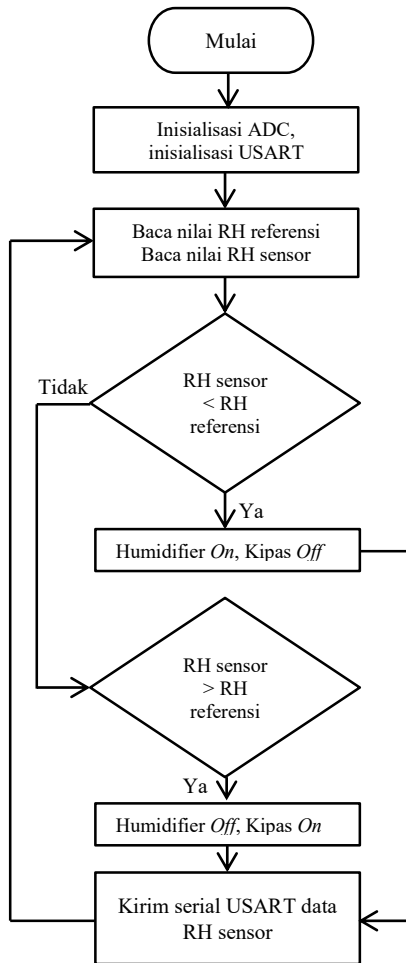
Parameter penting dalam menggunakan penguat instrumen dalam tugas akhir ini adalah GBW (*Gain Bandwidth Product*). IC AD620 memiliki GBW maksimal sebesar 1.2 MHz. Untuk menghindari distorsi pada sinyal keluaran, penguatan dari IC AD620 tidak boleh melebihi gain maksimum IC pada frekuensi sinyal input 10 kHz (frekuensi sinyal eksitasi sensor) yaitu sebesar $1.200.0000/10000 = 1200$ kali. Dari pertimbangan ini dipilih nilai gain sebesar 400 kali. Resistor RG diimplementasikan menggunakan resistor variabel *multiturn* dengan nilai sebesar 1K Ω . Untuk menset nilai gain sebesar 400 kali, berdasarkan persamaan 3.10 RG diatur hingga nilainya $\approx 123,8 \Omega$.

Nilai gain dari penguat instrumentasi juga perlu diperhatikan agar tidak terlalu besar, untuk menghindari distorsi sinyal keluaran akibat dari *slew limiting*. IC AD620 memiliki tipikal *slew rate* 1.2V/ μ s. Dengan frekuensi sinyal input 10kHz, maka amplitudo maksimal pada sinyal keluaran tidak boleh melebihi $2 \times \pi \times f \times A_{\max}$. Dengan *slew rate* sebesar 1.2V/ μ s maka $A_{\max} = 1.200.000 / (2 \times \pi \times 10.000) = 19$ Volt.

3.4 Kontroller

Proses kontrol pada sistem pengaturan kelembaban mengambil nilai galat dari sensor HS1101. Pada sensor diimplementasikan *analog front end* untuk mengompensasi *stray capacitance* yang dapat mempengaruhi hasil pembacaan sensor. Pada tugas akhir ini diimplementasikan kontroller *on-off* dimikrokontroller STM32. Kontroller yang sangat sederhana ini digunakan dengan tujuan untuk mengevaluasi performa sistem pengaturan kelembaban akibat dari implementasi pengukuran kelembaban relatif yang menggunakan *analog front end*. Dengan penggunaan kontroller yang sederhana, maka respon dari sistem pengaturan kelembaban merupakan pengaruh langsung dari hasil pengukuran sensor dengan implementasi *analog front end*, tanpa pengaruh yang signifikan dari kontroller. Salah satu tujuan lain adalah untuk memverifikasi hasil pengukuran sensor kapasitif dengan *analog front end* untuk contoh aplikasi dunia nyata.

Diagram alir program kontroller *on-off* yang diimplementasikan pada mikrokontroller STM32 dapat dilihat pada gambar 3.13 berikut:



Gambar 3.13 Diagram alir program kontroller

Program kontroller diawali dengan inisialisasi periperal ADC dan USART STM32. *Loop* program dimulai dengan membaca nilai RH yang sudah didefinisikan pada program sebagai nilai RH referensi. Nilai RH sensor kemudian dibaca melalui pembacaan ADC dan proses konversi ke nilai RH, selanjutnya nilai RH sensor dibandingkan dengan nilai RH

referensi. Apabila nilai RH sensor lebih kecil dari nilai RH referensi maka sinyal kontrol berupa modulasi lebar pulsa(PWM) dikirimkan ke *driver* untuk mengaktifkan akuator *humidifier*. Jika nilai RH sensor lebih besar dari nilai RH referensi maka sinyal PWM dikirimkan ke driver untuk mengaktifkan akuator kipas ventilasi. Nilai RH sensor kemudian dikirimkan secara serial USART, kemudian program kembali ke awal *loop* program.

3.5 Aktuator dan Driver

Untuk menghasilkan aksi kontrol diperlukan akuator. Pada tugas akhir ini, untuk mengendalikan kelembaban dibutuhkan dua akuator yaitu *humidifier* ultrasonik dan kipas ventilasi. Untuk mengaktifkan dan menon-aktifkan akuator dengan masukan sinyal kontrol digunakan rangkaian *driver* yang menggunakan *Solid State Relay(SSR)*.

3.5.1 Humidifier Ultrasonik

Dalam sebuah sistem kontrol, nilai *set point* atau nilai referensi merupakan keluaran yang diharapkan dari *plant* yang dikendalikan. Dalam sistem kontrol kelembaban, apabila keluaran dari *plant* belum mencapai nilai referensi, maka dibutuhkan aksi kontrol untuk meningkatkan keluaran dari *plant*, dalam hal ini kelembaban.



Gambar 3.14 Tampilan fisik *humidifier* ultrasonik

Pada tugas akhir ini digunakan *humidifier* ultrasonik produksi Kris dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Kapasitas tangki penyimpanan air : 2,5 Liter
- Aliran keluaran embun : 250 ml/jam
- Derau : 35 desibel
- Tegangan kerja : 220 Volt 50Hz
- Konsumsi daya maksimum : 20 Watt

3.5.2 Kipas Ventilasi



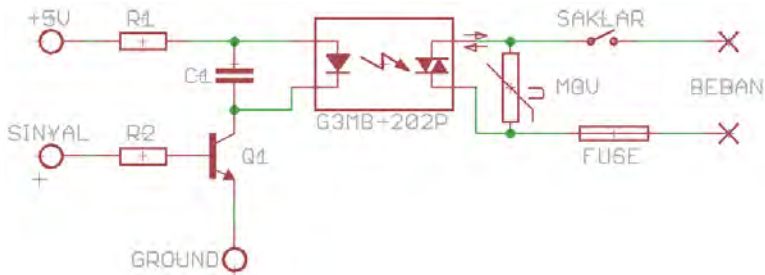
Gambar 3.15 Tampilan fisik kipas ventilasi

Apabila nilai kelembaban relatif udara pada *plant* yang dikendalikan lebih besar dari nilai referensi, dibutuhkan aksi kontrol untuk mengurangi kelembaban. Salah satu cara mengurangi kelembaban udara adalah dengan mengeluarkan udara yang mengandung uap air dari dalam ruangan. Untuk mengurangi kelembaban pada *plant* digunakan sebuah kipas ventilasi dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Dimensi : 15 cm x 15 cm
- Tegangan kerja : 12 Volt DC
- Arus kerja : 0,12 Ampere

3.5.3 Rangkaian Solid State Relay

Rangkaian driver dengan SSR digunakan untuk *mendrive* aktuator berupa *humidifier* ultrasonik dan kipas ventilasi dengan sinyal kontrol PWM dari controller. SSR dipilih sebagai *driver* karena responnya lebih cepat dibandingkan dengan saklar elektromekanik dan aman karena masukan dan keluarannya terisolasi secara optik. SSR juga dapat beroperasi untuk mensaklar tegangan DC maupun AC pada keluarannya sehingga dapat digunakan untuk kedua aktuator. Berikut skematik rangkaian *driver* dengan menggunakan SSR :



Gambar 3.16 Skematik rangkaian driver dengan menggunakan SSR

Pada rangkaian driver, digunakan SSR G3MB-202P yang merupakan SSR dengan keluaran *photo-TRIAC* produksi OMRON. SSR ini memiliki spesifikasi antara lain :

- Beban keluaran maksimal 2A@100-240Volt AC
- Tegangan input 5V DC 50mA maksimum
- Resistor input dan rangkaian snubber internal
- Rangkaian *zero-cross* internal

SSR ini dipilih karena memiliki rating atau spesifikasi arus beban maksimal 2A, sehingga mampu untuk men-saklar beban berupa *humidifier* ultrasonik dengan daya 20W pada tegangan 240VAC. SSR ini juga memiliki fitur – fitur proteksi seperti rangkaian *snubber* internal dan rangkaian *zero-cross* internal sehingga lebih aman untuk digunakan men-saklar beban AC. Pada skematik rangkaian, R1 dan C1 berfungsi sebagai filter *low pass* untuk menghilangkan derau frekuensi tinggi yang

mungkin terkopel ke tegangan input +5V. Nilai R1 dan C1 dipilih 470Ω dan 1nF sehingga didapatkan frekuensi $cut-off\ fc = \frac{1}{2\pi RC} \approx 338,6\text{ kHz}$.

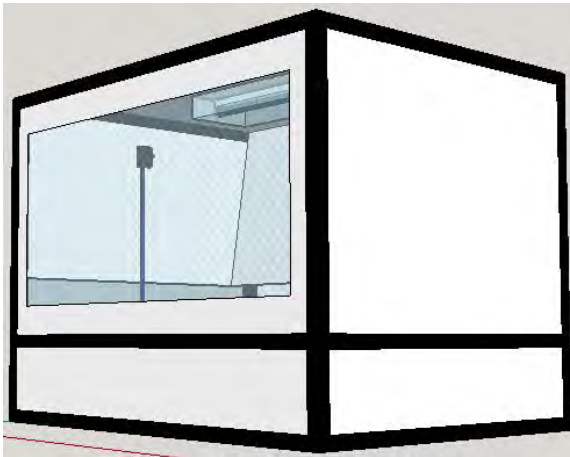
Resistor R2 digunakan sebagai resistor masukan dari basis transistor Q1. Transistor Q1 digunakan untuk men-saklar led masukan dari SSR dengan sinyal masukan berupa sinyal kontrol PWM dari kontroller. Nilai R1 dipilih 100Ω dan transistor Q1 digunakan transistor NPN 2N2222.

Pada bagian keluaran, ditambahkan komponen MOV(Metal Oxide Varistor) dengan tegangan *clamping* DC 430 Volt dan Fuse (sekering) 1 Ampere sebagai pengaman terhadap tegangan transient yang melebihi tegangan kerja SSR, dan arus beban yang melebihi rating SSR akibat arus *inrush* dari beban AC yang disaklar. Sebuah saklar ditambahkan untuk menghubungkan dan memutus beban secara manual, sehingga apabila terjadi kerusakan atau malfungsi pada SSR dan beban tidak dapat di-saklar mati oleh sinyal masukan, sambungan ke beban dapat diputus secara manual.

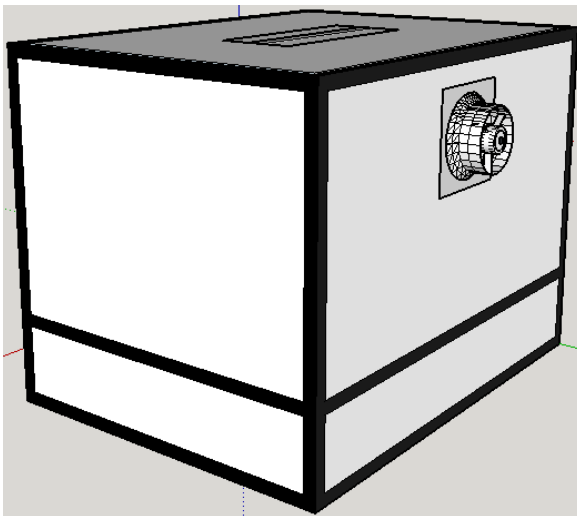
3.6 Plant Growth Chamber

Pada tugas akhir ini dirancang sebuah *plant growth chamber* sederhana dengan dimensi 40cm x 40cm x40cm. *Plant growth chamber* ini digunakan sebagai contoh aplikasi pengaturan kelembaban, dan memverifikasi hasil pengukuran sensor kapasitif dengan menggunakan *analog front end*. Kriteria yang harus dimiliki dari *plant growth chamber* yang didesain antara lain : memiliki sumber cahaya, ruangan tertutup dengan insulasi yang baik, dan kelembaban yang dapat diatur/ dikendalikan. Dari kriteria desain ini, dibuat suatu gambar tiga dimensi untuk memvisualisasikan desain yang diinginkan. Gambar tiga dimensi desain dibuat menggunakan perangkat lunak *Sketch-up*.

Pada gambar 3.17 terlihat visualisasi peletakkan sensor pada bagian dinding sebelah kiri dari *chamber* serta sebuah lampu led pada bagian langit – langit dari *chamber*. Pada visualisasi, bagian depan *chamber* sengaja dibuat transparan agar ruangan bagian dalam dapat terlihat. Pada visualisasi tampak belakang gambar 3.18, terlihat peletakkan salah satu aktuatur yaitu kipas ventilasi pada bagian belakang *chamber*. *Humidifier* ultrasonik pada desain ini diletakkan pada bagian dalam sehingga tidak tampak dari luar.



Gambar 3.17 Visualisasi 3D tampak depan dari desain *plant growth chamber*



Gambar 3.18 Visualisasi 3D tampak belakang dari desain *plant growth chamber*

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS

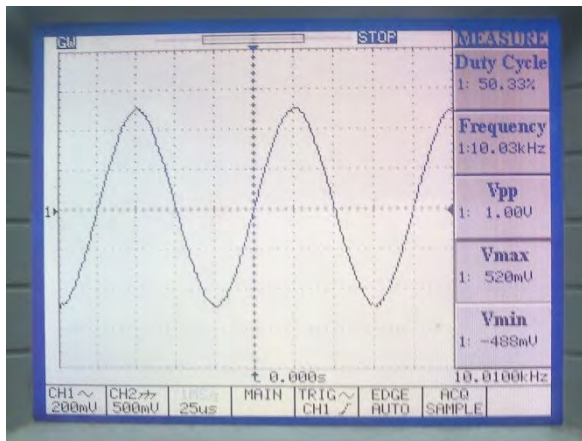
4.1 Pengujian Rangkaian Generator Sinyal

Pengujian yang dilakukan pada bagian ini adalah untuk memastikan frekuensi, amplitudo, dan bentuk sinyal keluaran yang dihasilkan dari rangkaian generator sinyal sesuai dengan kriteria yang dirancang.

Rangkaian sinyal generator yang diuji harus memenuhi kriteria rancangan, yaitu :

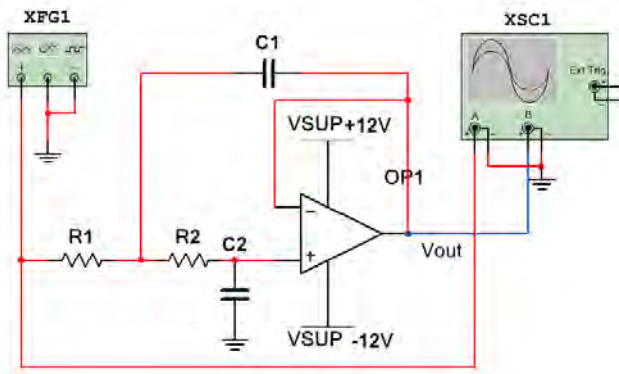
- Frekuensi keluaran sinyal sinusoidal : 10 KHz
- Tegangan keluaran sinyal sinusoidal : 1Vpp
- *Duty Cycle* keluaran sinyal sinusoidal : 50%

Dari hasil pengujian didapatkan kesalahan frekuensi keluaran generator sinyal sebesar $10,03 \text{ KHz} - 10 \text{ KHz} = 0,03 \text{ kHz}$ atau 30 Hz, dan kesalahan *duty cycle* $50,33\% - 50\% = 0,33\%$. Kesalahan ini masih dalam batas toleransi dari rangkaian dan tidak mempengaruhi kinerja sistem. Berdasarkan pengujian ini dapat disimpulkan bahwa rangkaian sudah bekerja sesuai dengan kriteria rancangan.



Gambar 4.1 Hasil pengujian rangkaian generator sinyal

4.2 Pengujian Rangkaian LPF -40dB/dec



Gambar 4.2 Pengujian rangkaian rangkai LPF -40dB/dec 2.5Hz

Pengujian yang dilakukan pada bagian ini adalah untuk bertujuan untuk memastikan respon frekuensi dari filter *low pass* sesuai dengan kriteria yang dirancang. Pengujian dilakukan dengan memberikan input sinyal sinus dengan amplitudo 1 Vpp dengan frekuensi bervariasi dari 0,1 Hz hingga 100 Hz. Pengujian dilakukan seperti pada Gambar 4.2 dan hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.3

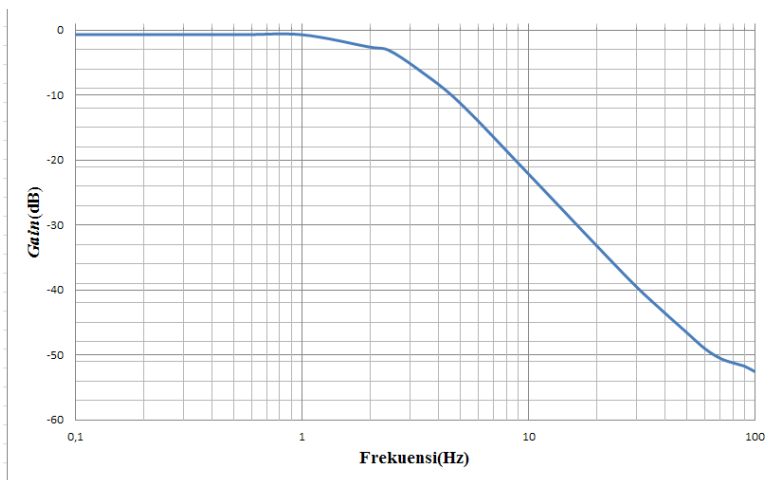
Filter yang dirancang mempunyai frekuensi *cut-off* 2.5 Hz. Secara teori saat frekuensi masukan sama dengan frekuensi *cut-off*, *gain* dari sinyal keluar adalah 0,707 atau -3dB. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, didapat:

- frekuensi pada saat penguatan 0.707 adalah antara 2,4 Hz.
- Penguatan maksimum pada daerah passband adalah 0,96 kali.
- Kesalahan frekuensi *cut-off* adalah $2,5\text{Hz} - 2.4\text{Hz} = 0,1\text{Hz}$.

Jika dibandingkan antara pengujian dan teori maka frekuensi *cut-off* dari filter belum tepat, namun untuk aplikasi filter keluaran demodulator sinkron, kesalahan frekuensi *cut-off* ini tidak berpengaruh. Karena filter ini sudah dapat menjalankan fungsinya yaitu merata-rata keluaran dari demodulator sinkron sehingga didapatkan respon DC yang proporsional terhadap amplitudo sinyal keluaran *analog front end*.

Tabel 4.1 Pengujian rangkaian rangkaian LPF -40dB/dec 2.5Hz
 $V_{input} = 1V_{pp}$

$f_{in}(Hz)$	$V_{out}(V)$
0,1	0,96
0,5	0,96
1	0,96
2	0,8
2,4	0,72
3,289	0,504
5	0,28
10	0,08
20	0,0224
30	0,0108
40	0,0068
50	0,0048
60,24	0,0036
70,26	0,00304
80,21	0,0028
90,09	0,00264
100	0,0024



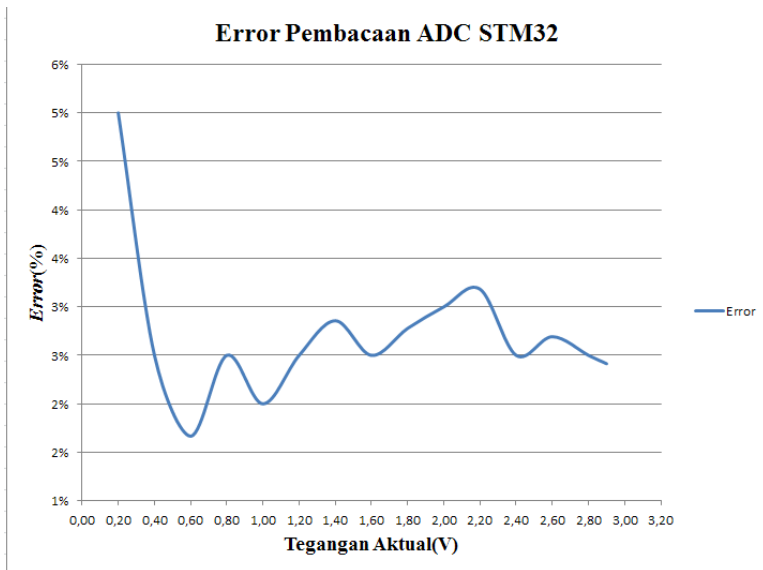
Gambar 4.3 Grafik pengujian rangkaian rangkaian LPF -40dB/dec 2.5Hz

4.3 Pengujian Pembacaan ADC STM32

ADC(Analog to Digital Converter) pada mikrokontroller STM32 digunakan untuk mengonversi sinyal analog keluaran dari sistem akuisisi data menjadi data digital. ADC SAR(Succesive Approximation) pada STM32 memiliki resolusi 12 bit dengan frekuensi sampling maksimal 1 MS/s. Pengujian dilakukan untuk melihat karakteristik akurasi dari ADC pada mikrokontroller STM32. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan tegangan masukan yang akan dibaca ADC kemudian membandingkan hasil pembacaan ADC dengan nilai aktual tegangan yang dibaca oleh voltmeter digital pada LCR Meter BK Precision 889B. Pada pengujian ini, digunakan ADC *Channel 0*(pin A0). Berikut spesifikasi pengukuran tegangan DC dari LCR Meter BK Precision 8089B :

Tabel 4.2 Tabel Perbandingan Pembacaan Tegangan ADC dengan Pembacaan Tegangan Aktual

Tegangan Aktual(V)	Tegangan Terbaca(V)	Galat (%)
0,20	0,20	5,00
0,40	0,41	2,50
0,60	0,61	1,67
0,80	0,82	2,50
1,00	1,02	2,00
1,20	1,23	2,50
1,40	1,44	2,86
1,60	1,64	2,50
1,80	1,85	2,78
2,00	2,06	3,00
2,20	2,27	3,18
2,40	2,46	2,50
2,60	2,67	2,69
2,80	2,87	2,50
2,9	2,97	2,41



Gambar 4.3 Grafik kesalahan pembacaan tegangan ADC STM32 terhadap tegangan aktual

Spesifikasi pengukuran tegangan DC BK Precision 8089B :

- Resolusi : 1mV, 10mV, 100mV, 1V
- Akurasi : +/- (0.4% + 3 digit)
- Impedansi Input : 1 M Ω

Dari percobaan didapatkan hasil pembacaan tegangan dengan ADC mikrokontroller STM32. Hasil dari percobaan tersebut diketahui bahwa pembacaan tegangan menggunakan ADC mikrokontroller STM32 memiliki kesalahan maksimal yaitu 5% dan rata-rata kesalahan sebesar 2,71%.

4.4 Pengujian Analog Front End

Pengujian ini dilakukan untuk verifikasi hasil desain dari rangkaian *analog front end* dan memastikan rangkaian berfungsi sesuai dengan kriteria perancangan. Pengujian dilakukan memverifikasi kemampuan rangkaian dalam mengompensasi adanya stray capacitance pada sensor kapasitif, serta membandingkan hasil pengukuran sensor kapasitif

dengan menggunakan *analog front end*, terhadap hasil pengukuran sensor kapasitif tanpa menggunakan *analog front end*.

4.4.1 Pengujian Kompensasi *Stray Capacitance*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui performa *analog front end* dalam mengkompensasi *stray capacitance*. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan kapasitansi dari sensor yang berupa 6 buah kapasitor yang nilainya sudah diukur sebelumnya menggunakan LCR Meter BK Precision 8089B. Sensor dihubungkan menggunakan kabel audio Canare L2T2S sepanjang 2 Meter, 1.5 Meter dan 1 Meter dengan *stray capacitance* terukur LCR masing – masing sebesar 236,6pF ; 174,3pF dan 115,7 pF. Berikut hasil pengujian untuk masing – masing nilai *stray capacitance*:

Tabel 4.3 Hasil pengujian *analog front end* pada kondisi *stray capacitance* = 236,6pF

Nominal Cx	Vout
10,2 pF	248 mV
15,3 pF	296 mV
20,2 pF	344 mV
25,4 pF	392 mV
33,4 pF	464 mV
38,5 pF	512 mV

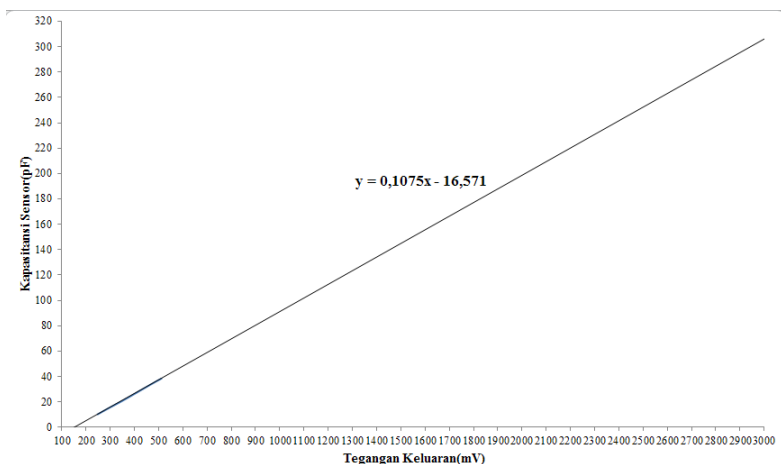
Tabel 4.4 Hasil pengujian *analog front end* pada kondisi *stray capacitance* = 174,3pF

Nominal Cx	Vout
10,2 pF	192 mV
15,3 pF	240 mV
20,2 pF	288 mV
25,4 pF	336 mV
33,4 pF	408 mV
38,5 pF	456 mV

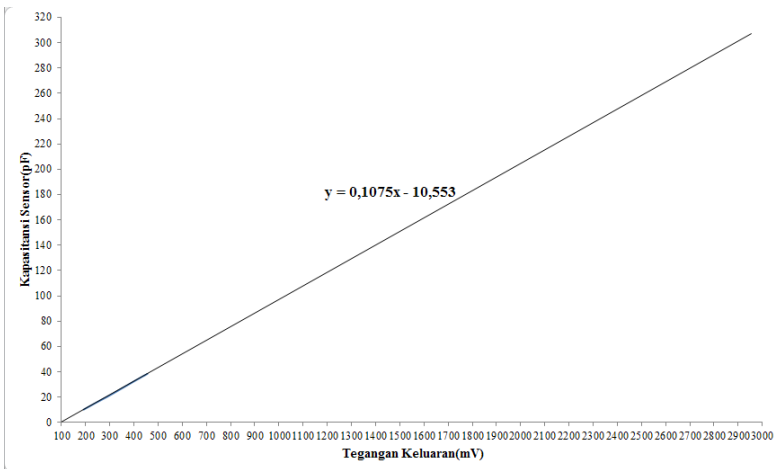
Tabel 4.5 Hasil pengujian *analog front end* pada kondisi stray capacitance = 115,7 pF

Nominal Cx	Vout
10,2 pF	192 mV
15,3 pF	248 mV
20,2 pF	288 mV
25,4 pF	336 mV
33,4 pF	408 mV
38,5 pF	456 mV

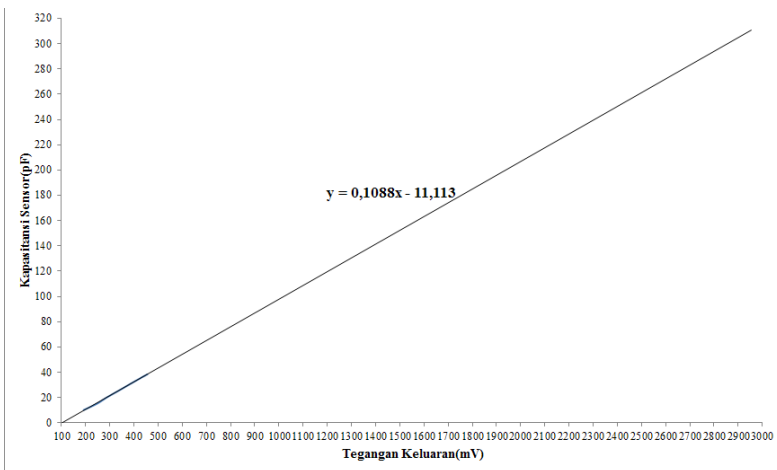
Pada pengujian ini semua data didapatkan dengan kondisi yang sama, yaitu penguatan rangkaian penguat instrumentasi = 400 kali. Sinyal eksitasi sinusoidal 1Vpp 10 kHz. Untuk mendapatkan pembacaan dalam kapasitansi, tegangan keluaran pada tiap – tiap kondisi *stray capacitance* diplot dalam grafik, terhadap nilai kapasitor yang diukur. Dilakukan regresi linier untuk mendapatkan persamaan yang menyatakan hubungan antara tegangan keluaran dari *analog front end* dengan nilai kapasitansi yang terukur.



Gambar 4.4 Grafik hubungan antara kapasitansi sensor terhadap tegangan keluaran dengan regresi linier untuk nilai *stray capacitance* 236,6pF



Gambar 4.5 Grafik hubungan antara kapasitansi sensor terhadap tegangan keluaran dengan regresi linier untuk nilai *stray capacitance* 174,3pF



Gambar 4.6 Grafik hubungan antara kapasitansi sensor terhadap tegangan keluaran dengan regresi linier untuk nilai *stray capacitance* 115,7pF

Dari regresi linier grafik pada gambar 4.4, 4.5 dan 4.6 didapatkan persamaan hubungan antara kapasitansi sensor terhadap tegangan keluaran untuk masing – masing nilai *stray capacitance* yaitu :

$$\begin{aligned} y &= 0,1075 \cdot x - 16,571 & (236,6pF) \\ y &= 0,1075 \cdot x - 10,553 & (174,3pF) \\ y &= 0,1088 \cdot x - 11,113 & (115,7pF) \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut, pada pengujian berikutnya dilakukan konversi hasil pembacaan dari milivolt ke picofarad. Hasil pengujian yang dilakukan sebagai berikut :

Tabel 4.6 Hasil pengujian dengan konversi pembacaan dalam kapasitansi untuk *stray capacitance* 236,6pF

Nominal Cx	Terukur	Kesalahan
10,2 pF	10,1 pF	0,111pF
15,3 pF	15,2 pF	0,051pF
20,2 pF	20,4 pF	0,209pF
25,4 pF	25,6 pF	0,169pF
33,4 pF	33,3 pF	0,091pF
38,5 pF	38,5 pF	0,031pF

Tabel 4.7 Hasil pengujian dengan konversi pembacaan dalam kapasitansi untuk *stray capacitance* 174,3pF

Nominal Cx	Terukur	Kesalahan
10,2 pF	10,1 pF	0,113 pF
15,3 pF	15,2 pF	0,053 pF
20,2 pF	20,4 pF	0,207 pF
25,4 pF	25,6 pF	0,167 pF
33,4 pF	33,3 pF	0,093 pF
38,5 pF	38,5 pF	0,033 pF

Tabel 4.8 Hasil pengujian dengan konversi pembacaan dalam kapasitansi untuk *stray capacitance* 115,7pF

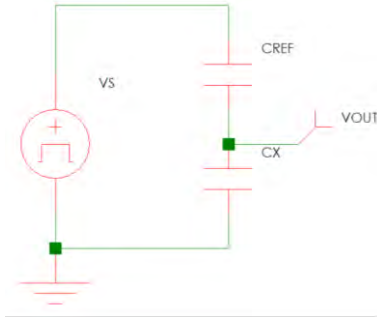
Nominal Cx	Terukur	Kesalahan
10,2 pF	9,8 pF	0,4234 pF
15,3 pF	15,9 pF	0,5694 pF
20,2 pF	20,2 pF	0,0214 pF
25,4 pF	25,4 pF	0,0438 pF
33,4 pF	33,3 pF	0,1226 pF
38,5 pF	38,5 pF	0,0002 pF

Dari hasil pengujian ini didapatkan nilai kesalahan pembacaan maksimal terhadap nilai nominal yang terukur LCR meter pada kondisi *stray capacitance* = 236,6 pF sebesar 0,209 pF dan nilai kesalahan maksimal pada kondisi *stray capacitance* = 174,3 pF sebesar 0,207 pF dan nilai kesalahan pembacaan maksomial pada kondisi *stray capacitance* = 115,7 pF sebesar 0,5694 pF.

Berdasarkan hasil regresi linier, didapatkan estimasi bahwa untuk kondisi nilai penguatan pada rangkaian penguat instrumentasi di *analog front end* sebesar 400 kali, didapatkan rentang pengukuran nilai kapasitansi maksimal yaitu ketika nilai tegangan keluaran *analog front end* sama dengan tegangan referensi dari ADC STM32(3 Volt). Untuk nilai *stray capacitance* = 236,6 pF nilai maksimum kapasitansi yang dapat diukur = 305,929 pF untuk *stray capacitance* = 174,3 pF nilai maksimum kapasitansi yang dapat diukur = 311,947 pF dan nilai maksimum kapasitansi yang dapat diukur untuk *stray capacitance* = 115,7 pF sebesar 315,287 pF.

4.4.2 Pengujian Pengukuran Sensor Kapasitif Tanpa Analog Front End

Pengujian ini dilakukan dengan melakukan pembacaan sensor kapasitif tanpa implementasi *analog front end*. Pengujian dilakukan untuk membandingkan hasil pembacaan sensor kapasitif dengan implementasi *analog front end* dengan hasil pembacaan tanpa *analog front end*, serta memvalidasi kemampuan *analog front end* untuk mengkompensasi *stray capacitance* pada sensor.



Gambar 4.7 Skematik rangkaian pengukuran tanpa *analog front end*

Sebagai pembanding, digunakan rangkaian pembagi tegangan dengan menggunakan kapasitor referensi dan kapasitor sensor. VS merupakan tegangan eksitasi yang sama dengan tegangan eksitasi yang digunakan untuk rangkaian *analog front end*, yaitu tegangan AC 1Vpp 10kHz. Tegangan pada VOUT dinyatakan dengan persamaan pembagian tegangan :

$$VOUT = \frac{Z_X}{Z_X + Z_{REF}} \cdot VS \quad (4.2)$$

Dimana $Z_X = \frac{1}{j\omega C_X}$ dan $Z_{REF} = \frac{1}{j\omega C_{REF}}$. Tegangan pada VOUT masih berupa tegangan AC sinusoidal. Untuk mendapatkan keluaran DC dilakukan proses yang sama seperti pada *analog front end* yaitu demodulasi sinkron dan filtering menggunakan filter *low pass* 2Hz.

Tegangan DC VS merupakan hasil dari penyearahan gelombang penuh dan merata – rata dari tegangan VOUT yang dapat dinyatakan dengan persamaan[1]:

$$VS = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} VOUT \cdot \sin \omega t \, dt = \frac{2 \cdot VOUT}{\pi} \quad (4.3)$$

Nilai kapasitansi sensor yang digunakan sama dengan nilai yang digunakan pada pengujian Analog Front End. Untuk mendapatkan nilai kapasitansi dari sensor, dilakukan konversi dari tegangan DC keluaran ke Z_X . Kapasitor referensi (C_{REF}) yang digunakan 148pF sehingga didapatkan nilai $Z_{REF} = 107537,1237 \Omega$. Nilai Z_X didapatkan dari persamaan :

$$Z_X = \frac{VS \cdot Z_{REF}}{\frac{1000}{\pi} - VS} \quad (4.4)$$

Nilai C_X didapatkan dari konversi Z_X berdasarkan persamaan $Z_X = \frac{1}{j\omega(C_X)}$. Berikut hasil pengujian pengukuran sensor kapasitif tanpa Analog Front End :

Tabel 4.9 Hasil pengukuran sensor kapasitif tanpa menggunakan Analog Front End untuk nilai *stray capacitance* = 236,6pF

Nominal Cx	Terukur	Kesalahan
10,2 pF	1,4 pF	8,8 pF
15,3 pF	1,4 pF	13,9 pF
20,2 pF	1,4 pF	18,8 pF
25,4 pF	1,4 pF	24,0 pF
33,4 pF	1,4 pF	32,0 pF
38,5 pF	1,4 pF	37,1 pF

Tabel 4.10 Hasil pengukuran sensor kapasitif tanpa menggunakan Analog Front End untuk nilai *stray capacitance* = 174,3pF

Nominal Cx	Terukur	Kesalahan
10,2 pF	1,0 pF	9,2 pF
15,3 pF	1,0 pF	14,3 pF
20,2 pF	1,1 pF	19,1 pF
25,4 pF	1,1 pF	24,3 pF
33,4 pF	1,1 pF	32,3 pF
38,5 pF	1,1 pF	37,4 pF

Tabel 4.11 Hasil pengukuran sensor kapasitif tanpa menggunakan Analog Front End untuk nilai *stray capacitance* = 115,7 pF

Nominal Cx	Terukur	Kesalahan
10,2 pF	0,7 pF	9,5 pF
15,3 pF	0,8 pF	14,5 pF
20,2 pF	0,8 pF	19,4 pF
25,4 pF	0,8 pF	24,6 pF
33,4 pF	0,9 pF	32,5 pF
38,5 pF	0,9 pF	37,6 pF

Dari hasil pengujian ini didapatkan nilai kesalahan pembacaan maksimal terhadap nilai nominal yang terukur LCR meter pada kondisi *stray capacitance* = 236,6 pF sebesar 37,1 pF dan nilai kesalahan maksimal pada kondisi *stray capacitance* = 174,3 pF sebesar 37,4 pF dan nilai kesalahan pembacaan maksimal pada kondisi *stray capacitance* = 115,7 pF sebesar 37,6 pF. Berikut perbandingan hasil pengukuran kapasitansi dengan penggunaan Analog front End dan tanpa menggunakan Analog Front End :

Tabel 4.12 Perbandingan hasil pengukuran untuk *stray capacitance* = 115,7pF

Cx Terukur LCR(pF)	Dengan Front End(pF)	Galat
10,2	9,8	4,2%
15,3	15,9	3,7%
20,2	20,2	0,1%
25,4	25,4	0,2%
33,4	33,3	0,4%
38,5	38,5	0,0%
Cx Terukur LCR(pF)	Tanpa Front End(pF)	Galat
10,2	0,7	93,1%
15,3	0,8	94,8%
20,2	0,8	96,0%
25,4	0,8	96,9%
33,4	0,9	97,3%
38,5	0,9	97,7%

Tabel 4.13 Perbandingan hasil pengukuran untuk stray capacitance = 174,3 pF

Cx Terukur LCR(pF)	Dengan Front End(pF)	Galat
10,2	10,1	1,1%
15,3	15,2	0,3%
20,2	20,4	1,0%
25,4	25,6	0,7%
33,4	33,3	0,3%
38,5	38,5	0,1%
Cx Terukur LCR(pF)	Tanpa Front End(pF)	Galat
10,2	1,0	90,2%
15,3	1,0	93,5%
20,2	1,1	94,6%
25,4	1,1	95,7%
33,4	1,1	96,7%
38,5	1,1	97,1%

Tabel 4.14 Perbandingan hasil pengukuran untuk stray capacitance = 236,6 pF

Cx Terukur LCR(pF)	Dengan Front End(pF)	Galat
10,2	10,1	1,1%
15,3	15,2	0,3%
20,2	20,4	1,0%
25,4	25,6	0,8%
33,4	33,3	0,3%
38,5	38,5	0,1%
Cx Terukur LCR(pF)	Tanpa Front End(pF)	Galat
10,2	1,4	86,3%
15,3	1,4	90,8%
20,2	1,4	93,1%
25,4	1,4	94,5%
33,4	1,4	95,8%
38,5	1,4	96,4%

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa pengukuran kapasitansi dengan menggunakan Analog Front End memiliki ketelitian yang lebih baik, untuk nilai *stray capacitance* yang sama, dengan kesalahan maksimum 4,2% dibandingkan dengan pengukuran kapasitansi tanpa menggunakan Analog Front End yang memiliki kesalahan maksimum 97,7%. Hasil ini menunjukkan pengaruh *stray capacitance* pada pengukuran dengan sensor kapasitif dengan nilai kapasitansi yang kecil dan memiliki perubahan yang kecil dapat menghasilkan kesalahan pembacaan yang signifikan apabila tidak dikompensasi.

4.5 Kalibrasi Pengukuran Kelembaban Relatif dengan Implementasi Analog Front End

Untuk mengkalibrasi suatu pengukuran dibutuhkan suatu kuantitas yang diketahui nilainya sebagai pembanding atau referensi. Dalam hal ini diperlukan suatu kondisi nilai kelembaban relatif yang diketahui nilainya, untuk digunakan sebagai kalibrator, dengan menyesuaikan hasil pembacaan sensor dengan nilai kelembaban relatif yang diketahui(referensi) tersebut. Salah satu metode untuk menghasilkan nilai kelembaban yang diketahui adalah dengan menggunakan larutan garam tersaturasi. Pada pengujian ini, dua jenis garam yaitu NaCl dan $MgCl_2$ digunakan untuk menghasilkan nilai kelembaban relatif yang diketahui.

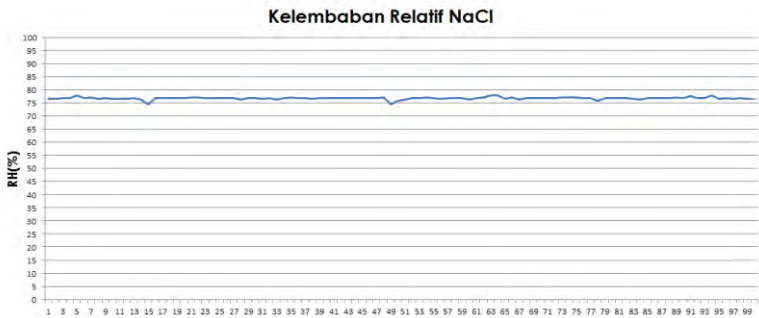
Dari data pada tabel 2.2 dan referensi[19] dapat disimpulkan untuk larutan garam NaCl dengan air yang terdestilasi(aquadest) dihasilkan kelembaban relatif yang stabil dan independen terhadap suhu, pada nilai RH 75% dengan deviasi RH maksimum $\pm 0,8\%$. Sedangkan untuk larutan garam $MgCl_2$ dihasilkan nilai kelembaban relatif 33% dengan deviasi RH maksimum $\pm 2\%$.

Sebelum dilakukan kalibrasi, larutan garam harus mencapai kondisi ekuilibrium. Untuk itu larutan garam disimpan dalam wadah tertutup yang kedap udara selama 24 jam sebelum digunakan untuk kalibrasi sensor. Kondisi pengujian untuk pembacaan sensor ditampilkan dalam tabel 4.15. Sensor terhubung dengan kabel sepanjang 2 Meter dengan *stray capacitance* terukur sebesar 236,6 pF. Untuk mengompensasi *stray capacitance* kabel, pada rangkaian pengali kapasitansi, dipilih nilai kapasitansi referensi $C_R = 149,7\text{pF}$ dan nilai $R_1 = 580\Omega$ dan $R_2 = 1\text{K}\Omega$ (gambar 3.11).

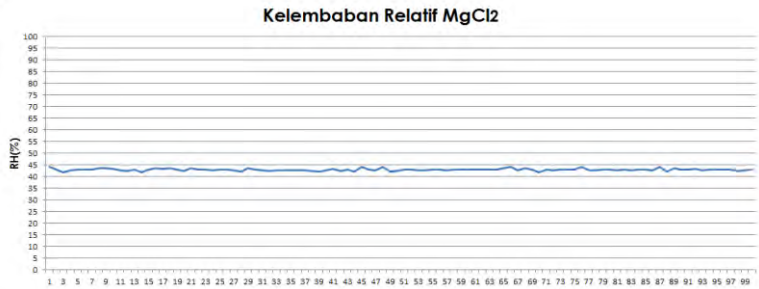
Tabel 4.15 Kondisi pengujian pembacaan sensor dengan larutan garam NaCl

Berat Garam	Berat Aquadest	Nilai Referensi[19]
50 mg NaCl	25 Mg	75,8 %
50 mg MgCl2	5 Mg	33,2 %

Berikut hasil pengujian untuk kedua larutan garam dalam tampilan grafik :



Gambar 4.8 Grafik hasil pengukuran kelembaban relatif larutan garam NaCl menggunakan sensor HS1101 dan Analog Front End



Gambar 4.9 Grafik hasil pengukuran kelembaban relatif larutan garam MgCl₂ menggunakan sensor HS1101

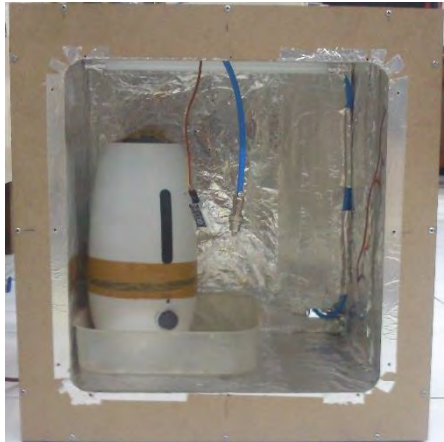
Grafik hasil pengujian menunjukkan pembacaan kelembaban relatif untuk kelembaban relatif 75% memiliki akurasi sebesar 97,33% dan akurasi pembacaan kelembaban relatif untuk nilai kelembaban relatif sebesar 33% memiliki akurasi sebesar 66,67%. Hasil kalibrasi ini kemudian digunakan untuk menyesuaikan pembacaan sensor, terutama untuk nilai kelembaban relatif yang rendah(<50%) agar dihasilkan ketelitian yang lebih baik.

4.6 Realisasi Desain Plant Growth Chamber

Plant growth chamber yang direalisasikan pada tugas akhir ini memiliki bentuk kubus dengan dimensi panjang 40 cm, lebar 40 cm dan tinggi 40 cm. Konstruksi *chamber* terbuat dari bahan MDF(*Medium density fibreboard*). Alasan penggunaan bahan ini adalah mudah dimanipulasi, kokoh dan harganya relatif lebih murah untuk dimensi bahan yang luas dibandingkan dengan bahan lain, misalnya akrilik atau mika. Pada bagian depan dibuat lubang untuk akses ke bagian dalam *chamber* dengan ukuran 20 cm x 20 cm. Bagian dalam *chamber* dilapisi dengan *aluminium foil* untuk menjaga suhu udara didalam ruangan agar stabil dan tidak terlalu banyak dipengaruhi oleh suhu udara dilingkungan sekitar *chamber*. Aktuator kipas ventilasi dipasang dibagian belakang sedangkan humidifier ultrasonik diletakkan didalam *chamber*. Berikut tampilan dari hasil realisasi *plant growth chamber* :



Gambar 4.10 Realisasi *plant growth chamber*(tampak depan)

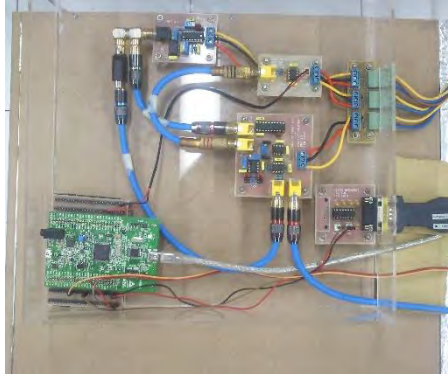


Gambar 4.11 Bagian dalam *plant growth chamber* serta penempatan akuator *humidifier* ultrasonik dan sensor kapasitif(tampak muka)

Pada gambar 4.11 tampak bagian dalam dari *plant growth chamber*, lokasi pemasangan sensor dan akuator *humidifier*. Gambar 4.12 merupakan tampak belakang dari *plant growth chamber*, letak pemasangan akuator kipas ventilasi dan instalasi pengkabelan sistem



Gambar 4.12 Penempatan akuator kipas ventilasi (tampak belakang)



Gambar 4.13 Penempatan perangkat akuisisi data dan *analog front end*(tampak atas)

Perangkat akuisisi data diletakkan pada bagian atas dari *chamber*, dengan koneksi kabel tegangan suplai dari catu daya pada bagian belakang *chamber*(gambar 4.14). *Driver* SSR dan koneksi catu daya DC ke sumber AC terletak pada bagian belakang *chamber*.



Gambar 4.14 Posisi rangkaian *driver* dan catu daya pada bagian belakang *plant growth chamber*

4.7 Pengujian Sistem Pengaturan Kelembaban Relatif

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh implementasi *analog front end* untuk pada sistem pengaturan kelembaban relatif. Pengujian dilakukan dengan menginputkan nilai kelembaban relatif referensi pada program kontroller di STM32. *Analog front end* diatur untuk mengompensasi *stray capacitance* dari kabel sepanjang 2 meter yang menghubungkan sensor kapasitif HS1101 ke rangkaian. Sebagai sensor pembanding pembacaan nilai kelembaban relatif pada *plant growth chamber* digunakan sensor DHT22.

Pada pengujian ini, digunakan dua nilai referensi kelembaban, yaitu 75% dan 33%. Hasil pengujian untuk nilai kelembaban referensi 75% didapatkan nilai kelembaban yang tercapai terukur pada sensor DHT22 sebesar 76% pada puncak respon kelembaban sedangkan pada sensor HS1101 didapatkan nilai kelembaban terukur pada puncak kelembaban sebesar 78%. Dari pengujian ini didapatkan galat respon kelembaban relatif sebesar 2,63% terhadap hasil pembacaan sensor DHT22.

Hasil pengujian untuk nilai kelembaban referensi 33% didapatkan nilai kelembaban yang tercapai, terukur pada sensor DHT22 sebesar 34% pada puncak respon kelembaban sedangkan pada sensor HS1101 didapatkan nilai kelembaban terukur pada puncak respon kelembaban sebesar 37%. Dari pengujian ini didapatkan galat respon kelembaban relatif sebesar 8.8% relatif terhadap hasil pembacaan sensor DHT22.

Sensor DHT22 memiliki ketelitian maksimum sebesar 2% dan ketelitian minimum 5%. Dari perbandingan ini dapat disimpulkan bahwa implementasi *analog front end* pada sensor kapasitif untuk pengaturan kelembaban menghasilkan galat maksimum pada *setting point* sebesar 8.8% untuk nilai *set point* sebesar 75% dan 33%.

LAMPIRAN

Program *Visual Basic* antarmuka akuisisi data pada komputer

```
Imports System
Imports System.Threading
Imports System.IO.Ports
Imports System.ComponentModel
Imports System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting
Imports System.Math
Public Class Form1
Dim i As Integer = 0
    Dim hasil = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}
    Dim nilaiy1, nilaiy2, nilaiy3, asss, bsss, csss, nilaiRH As Double
    Dim myPort As Array
    Dim hasilsensor As String()
    Dim statusbaca As Integer = 0
    Delegate Sub SetTextCallback(ByVal [text] As String)

    Private Sub Form1_Load(sender As System.Object, e As
        System.EventArgs) Handles MyBase.Load
        System.Windows.Forms.Control.CheckForIllegalCrossThreadCalls
        = False
        myPort = IO.Ports.SerialPort.GetPortNames()
        ComboBox1.Items.AddRange(myPort)
        Chart1.Series.Add("sensor1")
        Chart1.Series("sensor1").ChartType = SeriesChartType.Spline
        Chart1.Series("sensor1").BorderWidth = 2
        Chart1.Series.Add("sensor3")
        Chart1.Series("sensor3").ChartType = SeriesChartType.Spline
        Chart1.Series("sensor3").BorderWidth = 2
    End Sub

    Private Sub Button1_Click(sender As System.Object, e As
        System.EventArgs) Handles Button1.Click
        SerialPort1.PortName = ComboBox1.Text
        SerialPort1.BaudRate = ComboBox2.Text
        SerialPort1.Open()
        statusbaca = 1
```

End Sub

Private Sub SerialPort1_DataReceived(sender As System.Object, e As System.IO.Ports.SerialDataReceivedEventArgs) Handles

SerialPort1.DataReceived

 ReceivedText(SerialPort1.ReadLine())

 If statusbaca = 1 Then

 hasilsensor = SerialPort1.ReadLine.Split("/")

 TextBox1.Text = hasilsensor(0)

 'TextBox2.Text = hasilsensor(1)

 End If

 asss = Replace(hasilsensor(0), ".", ",")

 bsss = Replace(hasilsensor(1), ".", ",")

 nilaiy1 = CDBl(asss)

 nilaiy2 = CDBl(bsss)

 nilaiRH = -(((3.4656 * (10 ^ 3)) * (((asss / 180) ^ 3))) + ((1.0732 * (10 ^ 4)) * ((asss / 180) ^ 2)) - (((1.0457 * (10 ^ 4)) * (asss / 180))) + (3.2459 * (10 ^ 3)))

 nilaiRH = Format(nilaiRH, "00")

 Chart1.Series(0).Points.AddXY(i, nilaiy1)

 Chart1.Series(1).Points.AddXY(i, nilaiy2)

End Sub

Private Sub ReceivedText(ByVal [text] As String)

 If Me.RichTextBox1.InvokeRequired Then

 Dim x As New SetTextCallback(AddressOf ReceivedText)

 Me.Invoke(x, New Object() {(text)})

 Else

 Me.RichTextBox1.Text &= [text]

 End If

End Sub

Private Sub Button2_Click(sender As Object, e As EventArgs)

 Handles Button2.Click

 SerialPort1.Close()

 statusbaca = 0

End Sub

```
Private Sub Button3_Click(sender As Object, e As EventArgs)
    Handles Button3.Click
    Chart1.Series(0).Points.Clear()
    Chart1.Series(1).Points.Clear()
End Sub

End Class
```

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari perancangan, realisasi, dan pengujian alat pada tugas akhir ini dapat disimpulkan *analog front end* yang diimplementasikan dapat mengkompensasi stray capacitance pada sensor dengan kesalahan pembacaan nilai kapasitansi maksimal sebesar 0,5694 pF dengan gangguan stray capacitance sebesar 236,6pF, 174,3pF dan 115,7pF. Perbandingan dengan hasil pengukuran kapasitansi tanpa menggunakan *analog front end* menunjukkan bahwa pengukuran dengan *analog front end* memiliki ketelitian yang lebih baik dengan kesalahan maksimum sebesar 4.2% dibandingkan dengan pengukuran tanpa *analog front end* yang memiliki kesalahan maksimum sebesar 97,7%. Kalibrasi pengukuran kelembaban relatif dilakukan menggunakan kalibrator larutan garam tersaturasi NaCl dan MgCl₂ yang menghasilkan kelembaban relatif teoritis sebesar 75% dan 33%. Pembacaan kelembaban relatif sensor HS1101 untuk larutan NaCl memiliki akurasi sebesar 97,33%, sedangkan untuk larutan MgCl₂ didapatkan akurasi sebesar 66,67%. Hasil implementasi *analog front end* pada pengaturan kelembaban menghasilkan galat maksimum pada *setting point* sebesar 8.8% untuk nilai *set point* sebesar 75% dan 33%.

5.2 Saran

Pada aplikasi yang menggunakan sensor kapasitif, adanya *stray capacitance* sensor dapat mempengaruhi hasil pengukuran. Pengaruh stray capacitance pada sensor dapat dikompensasi dengan menggunakan *analog front end*. Berdasarkan dari kelemahan sistem diperlukan rencana kedepan dalam penelitian ini, yaitu sampel sensor kapasitif dan kabel dengan variasi *stray capacitance* perlu ditambah untuk mengevaluasi performa *analog front end* pada rentang *stray capacitance* yang lebih lebar. Hal ini dapat membantu dalam menentukan rentang kerja optimal dari *analog front end*. Perlu dilakukan kalibrasi dan validasi pengukuran kelembaban relatif dengan metode lain atau kalibrator lain yang memiliki tingkat akurasi yang lebih baik. Serta perlu adanya perbandingan dengan *analog front end* lainnya untuk membandingkan performa terhadap rangkaian sejenis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pallas-Areny, R., dan Webster, J. G., “Sensors and signal conditioning”, Wiley, New York, Ch. 6, 1991.
- [2] Analog Devices, “24-bit capacitance-to-digital converter with temperature sensor,” AD7747 datasheet.
- [3] Jia, Q. Meijer, G. Li, X. dan Guan, C., “An integrated interface for grounded capacitive sensors,” IEEE Sensors, pp. 1076–1079, 03 November, 2005.
- [4] Cyril, K. dan George, B., “A Simple Analog Front-End Circuit for Grounded Capacitive Sensors with Offset Capacitance,” in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2013©IEEE.
- [5] Gulhane A., “Inductive Versus Capacitive Position Sensor,” <http://www.robotlab.in/inductive-versus-capacitive-position-sensors/.html>(diakses 8 Mei 2016)
- [6] Guinta S., ”Ask The Application Engineer - 21,” <http://www.analog.com/library/analogDialogue/Anniversary/21.html>(diakses 10 Mei 2016)
- [7] Humirel, “Relative Humidity Sensor,” HS1100 datasheets, Juni 2002.
- [8] Nutaq.2015. “From Analog to Digital – Part 5: Signal Conditioning,” <http://www.nutaq.com/blog/analog-digital---part-5-signal-conditioning.html>(diakses 8 April 2016)
- [9] Georgia Institute of Technology.2014. “Ideal Opamp Circuits,” <http://users.ece.gatech.edu/mleach/ece3050/sp04/OpAmps01.pdf> (di akses 6 April 2016)
- [10] Lundberg, K., “Origin of The Miller Effect,” <http://www.mit.edu/~klund/papers/jmiller.pdf>(diakses 21 April 2016)
- [11] Hanif Messa, “Rancang Bangun Sistem Instrumentasi dan Pengolahan Digital Sinyal ECG untuk Analisa Variabilitas Parameter Temporal Berbasis Mikrokontroller ARM”, Institut Teknologi Sepuluh November, 2015.
- [12] Intersil, “Precision Waveform Generator/Voltage Controlled Oscillator,” ICL 8038 datasheet, Apr. 2001.

- [13] C. Sriprachuabwong, C. Srichan, T. Lomas and A. Tuantranont, "Simple RC Low Pass Filter Circuit Fabricated by Unmodified Desktop Inkjet Printer," in *International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2010©IEEE.
- [14] ST Microelectronics, "Discovery kit for STM32F407/417 line," STM32F4 Discovery datasheet, Sep. 2014.
- [15] Analog Devices, "Balance Modulator/Demodulator," AD630 datasheet, 2015.
- [16] Maxim Integrated, "+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers," MAX220–MAX249 datasheet, Jan. 2015.
- [17] BAFO Technologies. 2013."BF-810 USB To Serial Adapter(DB9)," <http://www.bafo.com/index.php/products/adapter/usb-cable-adapter/bf-810-usb-to-serial-adapter-db9.html>(diakses 1 Juni 2016)
- [18] Monica Putri Dewi, "Pengaturan Laju Kavitasasi Ultrasonik Untuk Mengatur Kelembaban Ruang Berbasis PID", Tugas Akhir S1 Teknik Elektro ITS Surabaya, 2011.
- [19] Wexler, A. dan Hasegawa, S., "Relative Humidity-Temperature Relationship of Some Saturated Salt Solution in The Temperature Range 0° to 50°C," Research of the National Bureau of Standards, vol. 53, No. 1, July, 1954.
- [20] Katagiri, F. Canelon-Suarez, D. Griffin, K. Petersen, J. Meyer, R. Siegle, M. dan Mase, K., "Design and Construction of an Inexpensive Homemade Plant Growth Chamber", *PLOS ONE*, vol. 10, no. 5, pp. e0126826, 2015.
- [21] Ogata, K., "Modern Control Engineering". Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 2010.
- [22] Best Vacuum."Boneco/Air-O-Swiss AOS 7147 Digital Ultrasonic Humidifier," <http://www.bestvacuum.com/air-o-swiss-7197.html>(diakses 8 April 2016)
- [23] Ali Express."10PCS 12025 120mm 12cm 24V 2pin 120x120x25mm DC Industrial Exhaust Fan," <http://www.aliexpress.com/item/12025-10PCS-120mm-12cm-24V-2pin-120x120x25mm-DC-Industrial-Exhaust-Fan/32265864230.html>(diakses 4 April 2016)
- [24] Sharp Microelectronics, "Solid State Relay and Application Circuits," Sharp Application Note, 1999.

BIODATA PENULIS



Rendy Setiawan dilahirkan di Balikpapan, 22 Maret 1994. Anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Suwarjo dan Siti Marwiyah. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN 007 Balikpapan, dilanjutkan dengan pendidikan menengah di SMPN 1 Balikpapan dan SMAN 1 Balikpapan. Pada tahun 2012, penulis memulai pendidikan di jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama kuliah penulis aktif membantu penyelenggaraan kegiatan dan aktif sebagai asisten laboratorium Elektronika Dasar dan praktikum Elektronika pada semester genap 2015-2016, serta aktif dalam Unit Kegiatan Mahasiswa ITS.

Email :

rendy.setiawan12@mhs.ee.its.ac.id

rendjong@gmail.com